



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Paraná

Setor de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)

RICARDO ADRIANO DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DE ESTAMPABILIDADE DO AÇO DC05 (DIN 10152) E VALIDAÇÃO
DAS DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS OBTIDAS VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

CURITIBA

2007



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Paraná

Setor de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)

RICARDO ADRIANO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE ESTAMPABILIDADE DO AÇO DC05 (DIN 10152) E VALIDAÇÃO
DAS DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS OBTIDAS VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec), Setor de Tecnologia, UFPR.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes.

CURITIBA

2007

Ricardo Adriano dos Santos

**AVALIAÇÃO DE ESTAMPABILIDADE DO AÇO DC05 (DIN 10152) E VALIDAÇÃO
DAS DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS OBTIDAS VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Mecânica** no Programa de **Pós-Graduação em Engenharia Mecânica** da Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 26 de fevereiro de 2007.

Prof. Carlos Henrique Marchi, Ph.D.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes, Ph.D.
Universidade Federal do Paraná
Orientador

Prof. Eduardo Márcio de Oliveira Lopes, Dr.
Universidade Federal do Paraná

*À minha esposa Daniele, à minha filha
Letícia, aos meus pais Benedito e Janete e
aos meus irmãos Rogério, Robson e Rafael*

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por sempre ter me proporcionado saúde e disposição;
- À Daniele, minha esposa, pela compreensão e ajuda na fase de revisão do texto;
- A toda minha família, pelo apoio e incentivo;
- Ao Professor Paulo Victor Prestes Marcondes, pela orientação e valiosas contribuições dadas a este trabalho;
- Aos meus amigos Luiz Maurício, pela ajuda na fase experimental do trabalho, e Ravilson, pela colaboração;
- Aos colegas Rodrigo e Heber, pela ajuda na etapa de simulação;
- Ao secretário Marcio, do PG-MEC, que contribuiu nas questões burocráticas;
- Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Avaliação de Estampabilidade do aço DC06 (DIN 10152) e Validação das Deformações Verdadeiras Obtidas via Simulação Numérica.** 2007. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Fabricação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba.

A conformação de chapas metálicas é destaque dentre os processos de fabricação. Hoje, há um aumento na aplicação de novos materiais como aços de alta resistência; a viabilidade do uso desses materiais depende do conhecimento de suas características e dos parâmetros dos processos de conformação. As curvas limite de conformação (CLC) são geralmente usadas como uma ferramenta para controle do nível de deformação dos materiais para produção de peças conforme exigências de projeto. Elas também são usadas nas indústrias para análise real de possíveis problemas na conformação de chapas ou comparação de conformabilidade de diferentes materiais. As CLCs são determinadas em testes tecnológicos nos quais a chapa é submetida a diferentes solicitações de embutimento profundo, deformação plana e estiramento biaxial. Nos testes mais utilizados, estas solicitações são realizadas pela deformação de tiras de chapa de diferentes larguras sobre punções de diferentes geometrias, como, por exemplo, o ensaio de Nakazima, que utiliza punção esférico, e o ensaio de Marciniak, com a utilização de punção cilíndrico, dentre outros. Este trabalho trata da utilização do punção cilíndrico para obtenção da CLC, comparando resultados com o ensaio de Nakazima. O ensaio de Marciniak utilizando *dummy blank* com espessura de 2 mm e furo de 50 mm foi o que apresentou melhores resultados. Foi realizada simulação numérica através de elementos finitos (MEF), estudando os efeitos de modelos de materiais no ensaio de Nakazima, em chapas de aço de alta estampabilidade. Observou-se, no modelo de material “Transverse Anisotropic”, resultados próximos aos experimentais.

Palavras-Chave

Curva limite de conformação

Dummy blank

Elementos finitos

Teste de Marciniak

ABSTRACT

SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Evaluation of Stampability of the DC06 (DIN 10152) and Validation of the True Deformation Through Finite Elements**. 2006. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Fabricação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba.

The sheet metal forming is a very important process of manufacture. Nowadays, we observe an increase of new materials applications like high strength steel and aluminum alloys; the viability for using these new materials depends both on the knowledge of their properties and on the forming process parameters. The forming limit diagram (FLD) is generally used for controlling the materials deformation level in production. The FLD is used in the industries as an auxiliary tool for sheet metal forming problems. These FLDs are determined in technologic tests wherein the sheet metal is submitted to different deformation states: deep drawing, plan state and/or biaxial stretch. On the tests, metal sheets metal with different widths are deformed by different geometry punches. For example, the Nakazima test uses a spherical punch and Marciniak test uses a cylindrical punch. In this work, a cylindrical punch was used, and the objective was to obtain the FLD for different dummy blank thickness and to compare those with Nakazima test results. The Marciniak test with 2 mm dummy blank thickness and 50mm hole diameter showed the best results. Numeric simulation was performed through finite elements (FEM), studying the effects of material models in the Nakazima test on high stampability steel. The “Transverse Anisotropic” material model showed results similar to the experimental ones.

Keywords:

Finite elements

Marciniak Test

Forming Limit Diagram

Dummy Blank

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Elementos diversos na tecnologia moderna de conformação de chapas (LANGE, 1997).....	21
FIGURA 2: Operação de estiramento por tração.....	22
FIGURA 3: Estampagem profunda de um copo cilíndrico. (a) Antes da estampagem; (b) Após a estampagem (DIETER, 1981).....	23
FIGURA 4: Estado de deformações atuantes no copo durante o embutimento (BRESCIANI, 1997).....	24
FIGURA 5: Tração uniaxial. (a) Corpo de prova; (b) Curvas tensão-deformação (KOBAYASHI et al., 1989).....	25
FIGURA 6: Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior (SOUZA, 1974).....	27
FIGURA 7: A curva tensão x deformação verdadeira (KEELER, 1968).....	29
FIGURA 8: Cálculo do valor de n	29
FIGURA 9: Método de amostragem para obtenção de r médio e Δr (USIMINAS, 1999)....	31
FIGURA 10: Deformação na espessura versus deformação na largura (USIMINAS, 1999).....	31
FIGURA 11: Anisotropia normal para vários materiais versus RCD (Razão Crítica dos Diâmetros). Um valor alto de \bar{r} indica boa conformabilidade (KEELER, 1968).....	32
FIGURA 12: Diagrama limite de conformação (WU E GEERS, 2005).....	35
FIGURA 13: Comparação de cálculo de elementos finitos no diagrama limite de conformação.....	35
FIGURA 14: Operação de embutimento profundo (KEELER, 1968).....	36
FIGURA 15: Operação de estiramento (KEELER, 1968).....	36
FIGURA 16: Representação dos possíveis defeitos na chapa em um diagrama $\epsilon_1 \times \epsilon_2$ (MARCINIAK E DUNCAN, 1992).....	37
FIGURA 17: Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais (USIMINAS, 1999).....	38

FIGURA 18: Deformações no embutimento profundo e no estiramento para uma malha circular (LANGE, 1993).....	39
FIGURA 19: Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação (USIMINAS, 1999).....	40
FIGURA 20: Curva limite de conformação de acordo com o método IRSID (USIMINAS, 1999).....	40
FIGURA 21: Curva limite de conformação segundo o método de Nakazima (USIMINAS, 1999).....	41
FIGURA 22: Ferramental utilizado para execução do teste Nakazima (RICHTER, 2003).....	42
FIGURA 23: Corpos de prova de diferentes larguras (CHEMIN, 2004).....	42
FIGURA 24: Curva CLC do aço DC06 com teste de Nakazima (CHEMIN, 2004).....	43
FIGURA 25: Pontos de máxima deformação atingidos com o filme de poliuretano (TIGRINHO, 2005).....	44
FIGURA 26: Modelo final curva limite de conformação do aço DC 06 (CHEMIN, 2004)	44
FIGURA 27: Ferramental utilizado para execução do teste de Marciniak (FLC CLUB, 2003)	45
FIGURA 28: Processo de análise por Elementos Finitos (BATHE, 1996).....	47
FIGURA 29: Elemento tipo “Shell”	49
FIGURA 30: Ferramental utilizado para execução do teste Marciniak.....	57
FIGURA 31: Corpos de prova utilizados no ensaio de Marciniak.....	58
FIGURA 32: Gabarito plástico flexível e transparente.....	60
FIGURA 33: Ferramenta para ensaio de Nakazima (CHEMIN, 2004).....	61
FIGURA 34: Modelamento do punção e matriz.....	61
FIGURA 35: Restrições aos graus de liberdade para a chapa.....	62
FIGURA 36: Configuração da malha.....	63
FIGURA 37: Metalografia da seção longitudinal da chapa com aumento de 200x.....	68
FIGURA 38: Metalografia da secção longitudinal da chapa com aumento de 500x.....	69
FIGURA 39: Gráfico Tensão vs. Deformação.....	74
FIGURA 40: Corpo de prova 200x200 do ensaio de Marciniak.....	75
FIGURA 41: DLC com <i>dummy blank</i> furo com de Ø 68 mm e 0,5 mm de espessura.....	75
FIGURA 42: CLC Nakazima (CHEMIN, 2004) comparada com CLC Marciniak.....	76
FIGURA 43: DLC <i>dummy blank</i> com 2 mm e 3 mm de espessura.....	76

FIGURA 44: CLCs com <i>dummy blanks</i> de 2 mm e 3 mm.....	77
FIGURA 45: DLC com <i>dummy blank</i> com 2 mm de espessura e furo de Ø 50 mm.....	78
FIGURA 46: CLC com <i>dummy blank</i> com 2 mm de espessura e furo de Ø 50 mm.....	78
FIGURA 47: Curvas Limite de Conformação de todos os casos estudados.....	79
FIGURA 48: Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo 3 <i>Parameter Barlat</i>	80
FIGURA 49: Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo 3 <i>Parameter Barlat</i>	80
FIGURA 50: Deformação no eixo ε_3 , segundo o modelo 3 <i>Parameter Barlat</i>	81
FIGURA 51: Distribuição de tensões no material, segundo o modelo 3 <i>Parameter Barlat</i> ..	81
FIGURA 52: Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo <i>Plastic Kinematic</i>	82
FIGURA 53: Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo <i>Plastic Kinematic</i>	82
FIGURA 54: Deformação no eixo ε_3 , segundo o modelo <i>Plastic Kinematic</i>	83
FIGURA 55: Distribuição de tensões no material, segundo o modelo <i>Plastic Kinematic</i>	83
FIGURA 56: Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo <i>Transverse Anisotropic</i>	84
FIGURA 57: Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo <i>Transverse Anisotropic</i>	84
FIGURA 58: Deformação no eixo ε_3 , segundo o modelo <i>Transverse Anisotropic</i>	85
FIGURA 59: Distribuição de tensões no material, segundo o modelo <i>Transverse Anisotropic</i>	86
FIGURA 60: Deformação ε_1 para <i>shear factor</i> 0,5 e 3 pontos de integração.....	86
FIGURA 61: Deformação ε_2 para <i>shear factor</i> 0,5 e 3 pontos de integração.....	87
FIGURA 62: Deformação ε_3 para <i>shear factor</i> 0,5 e 3 pontos de integração.....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152.....	54
TABELA 2: Casos estudados.....	58
TABELA 3: Tipo e quantidade de elementos utilizados.....	64
TABELA 4: Propriedades da chapa DC 06 utilizada.....	65
TABELA 5: Condições de Simulação.....	67
TABELA 6: Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152	70
TABELA 7: Composição química em % resultante da análise química do material	70
TABELA 8: Comparativo das propriedades LR, LE e A	71
TABELA 9: Parâmetros de estampagem R e n	72
TABELA 10: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais	88
TABELA 11: Tempo de processamento com variação do <i>shear factor</i>	89
TABELA 12: Tempo de processamento com variação do número de pontos de integração.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Element Method
MEF	Método dos Elementos Finitos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCV	<i>Conical Cup Value</i>
CLC	Curva Limite de Conformação
DIN	<i>Deutsche Industrie Normen</i>
DLC	Diagrama Limite de Conformação
IDDRG	<i>International Deep Drawing Research Group</i>
LDR	<i>Limit Drawing Ratio</i>
NBR	Norma Brasileira
RCD	Razão Crítica dos Diâmetros
UFPR	Universidade Federal do Paraná
LR	Limite de resistência à tração
LE	Limite de escoamento
IRSID	Instituto de Recursos Siderúrgicos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_0	Área inicial
$A_{m\acute{a}x}$	Alongamento máximo
Al	Alumínio
B	Bóro
C	Carbono
Cr	Cromo
cSt	Centistokes
Cu	Cobre
D_O	Diâmetro máximo do corpo de prova
D_{O_1} e D_{O_2}	Diâmetro inicial do círculo
D_{f_1}	Diâmetro maior da elipse
D_{f_2}	Diâmetro menor da elipse
D_m	Diâmetro médio do corpo de prova
$D_{m\acute{a}ximo}$	Diâmetro máximo do corpo de prova
$D_{m\acute{m}imo}$	Diâmetro mínimo do corpo de prova
d_p	Diâmetro do punção
e	Deformação convencional
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
e_1	Maior deformação convencional
e_2	Menor deformação convencional
e_3	Deformação convencional no sentido da espessura
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
Fe_3C	Cementita precipitada
in	Inch
K	Constante plástica de resistência
L	Comprimento após alongamento
l_0	Comprimento inicial

L_0	Comprimento antes do alongamento
l_f	Comprimento final
\ln	Logaritmo natural
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MoS_2	Bissulfeto de Molibdênio
n	Coefficiente de encruamento por deformação
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
P	Carga ou força
Pb	Chumbo
P_f	Carga de ruptura
r	Coefficiente de anisotropia de Lankford
r_{0°	Coefficiente de anisotropia a 0° da direção de laminação
r_{45°	Coefficiente de anisotropia a 45° da direção de laminação
r_{90°	Coefficiente de anisotropia a 90° da direção de laminação
\bar{r}	Anisotropia média
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
t_o	Espessura inicial da chapa
t_f	Espessura final da chapa
V	Vanádio
w_o	Largura inicial
w_f	Largura final
Δr	Anisotropia planar
ϵ	Deformação verdadeira
ϵ_1	Deformação verdadeira maior
ϵ_2	Deformação verdadeira menor
ϵ_3	Deformação verdadeira no sentido da espessura

ϵ_t	Deformação na espessura
ϵ_w	Deformação na largura
μ	Coeficiente de atrito
μm	Micrômetro
σ	Tensão verdadeira
σ_f	Limite de ruptura
σ_r	Limite de resistência
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONTEXTO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivos específicos	19
1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO	20
2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS.....	21
2.1 PLASTICIDADE APLICADA À CONFORMAÇÃO	24
2.1.1 Tensão de escoamento	26
2.1.2 Coeficiente de encruamento	28
2.1.3 Anisotropia.....	30
2.2 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	33
2.2.1 Análise de deformações via impressão de malha de círculos	37
2.2.2 Ensaios de conformabilidade.....	39
2.2.2.1 Teste de Nakazima.....	41
2.2.2.2 Teste de Marciniak.....	45
2.3 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	46
2.3.1 Aplicação do MEF aos processos de conformação	48
2.3.2 Formulação dos elementos finitos	50
2.3.3 Geração da malha	51

3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
3.1	MATERIAL UTILIZADO	54
3.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	54
3.3	ENSAIOS METALOGRAFICOS.....	55
3.4	ANÁLISE QUÍMICA.....	56
3.5	ENSAIO DE MARCINIAK.....	56
3.5.1	Materiais e Equipamentos Utilizados	56
3.6	PROCEDIMENTOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	60
3.6.1	Pré-processamento.....	60
3.6.1.1	Condições de contorno e carregamento	62
3.6.1.2	Condições de contato e atrito	63
3.6.1.3	Formulação da malha	63
3.6.1.4	Especificação da chapa	64
3.6.2	Processamento	66
3.6.2.1	Modelos Computacionais de Materiais.....	66
3.6.3	Pós-Processamento	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	ENSAIOS METALOGRAFICOS.....	68
4.2	ANÁLISE QUÍMICA.....	70
4.3	ENSAIOS DE TRAÇÃO	71
4.4	ENSAIOS DE MARCINIAK	75
4.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	79
5	CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	92
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	93
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

Keeler e Backofen (1963) estudaram a falha no estiramento biaxial e construíram um mapa de tensão que foi o início do que é conhecido como diagrama limite de conformação (DLC). Keeler (1968) descobriu, ainda, que as propriedades do material têm grande influência na distribuição da tensão no estiramento biaxial. Ele construiu um mapa de tensão principal, que é separado por estados de deformação. Marciniak e Kuczynski (1967) determinaram um método numérico para levantamento da curva limite de conformação, baseado nas falhas durante a estrição do material. Mais adiante, com o desenvolvimento da técnica experimental por Goodwin (1968), a curva limite de conformação (CLC) de um aço para estampagem foi obtida através de ensaio prático e serviu de critério para muitos processos de estampagem.

Segundo Sampaio et al (1993), uma boa ferramenta que tem sido utilizada para relacionar o limite de conformação do material, determinado em escala laboratorial, com as deformações em escala industrial é a CLC. Essa relação permite concluir se o material e o processo estão adequados à manufatura da peça em questão. A utilização da CLC é uma importante ferramenta para o desenvolvimento da aplicação de um determinado produto, como por exemplo, na etapa de testes de estampagem da indústria automobilística.

Segundo Lorentz e Gilapa (1998), a curva limite de conformação (CLC) é utilizada para uma compreensão da conformabilidade de chapas metálicas, que é essencial para a produção de estampados de qualidade. Projetistas de ferramentas devem determinar o nível de conformabilidade requerido para cada peça a ser estampada, para então conhecerem o nível de conformação do material que utilizam.

Richter (2003) destaca que os experimentos mais utilizados para a determinação da curva limite de conformação são os métodos segundo Nakazima e Marciniak, que utilizam punção esférico e punção cilíndrico, respectivamente. Ambos utilizam chapas de diferentes larguras para avaliação de diferentes estados de deformação e obtenção da curva.

A busca por um ensaio correto para determinação da CLC é um assunto muito discutido. As normas existentes dão algumas sugestões, mas não descrevem um procedimento para levantamento das curvas.

FLC Club (2004) destaca que o resultado disso é que diferentes laboratórios determinam curvas diferentes para um mesmo material. Isso se deve às diferenças na forma e tamanho das ferramentas utilizadas, à lubrificação durante o ensaio, ao tamanho da grade de medição e cálculos dos valores de deformação, todos fatores relevantes na construção da curva. Para geometrias mais complexas, tem-se ainda a influência da escolha do caminho das deformações medidas.

Rowe et al (1991) consideram que, com o aumento na velocidade de processamento e na capacidade dos computadores, a possibilidade de relacionar um grande número de variáveis vem ampliando o campo de utilização de métodos numéricos, principalmente o Método dos Elementos Finitos (MEF), para a simulação de processos de conformação.

1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho se deseja, utilizando o teste prático de Marciniak, levantar a curva CLC de uma chapa de aço de alta estampabilidade. Deseja-se também avaliar numericamente modelos de materiais, *shear factor* e pontos de integração através da técnica de elementos finitos, mediante *software* de simulação ANSYS / LSDYNA, buscando com isso dispor mais um recurso para avaliação e caracterização de chapas.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar o Método de Marciniak;
- Estudar o efeito das propriedades mecânicas fundamentais e testes simulativos práticos;
- Estudar as teorias utilizadas nos cálculos de deformação de chapas e curvas limite de conformação;
- Estudar a simulação pelo método dos elementos finitos;
- Analisar os métodos de avaliação de chapas;

- Levantar a curva limite de conformação do aço DC06 segundo o método Marciniak;
- Comparar a CLC obtida com outros métodos de ensaio;
- Analisar os resultados, indicando qual o método que melhor representa a curva limite de conformação;
- Simular o ensaio de Nakazima através da técnica de elementos finitos (MEF), verificando a influência dos modelos de materiais na simulação;
- Analisar influência do *dummy blank* na conformabilidade do material testado.

1.3 CONTEÚDO DO TRABALHO

A estrutura abaixo consiste em mostrar previamente como o trabalho será apresentado. De forma sucinta, esta dissertação mostrará:

- **Capítulo 1 – INTRODUÇÃO:** apresenta o tema do trabalho, o problema de pesquisa, as justificativas para a elaboração do projeto, a metodologia de pesquisa e o embasamento teórico.

- **Capítulo 2 – CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS:** Apresenta-se uma revisão bibliográfica, abordando e destacando as propriedades dos materiais com influência nos processos de conformação. Serão abordados, também, conceitos sobre os testes utilizados para obtenção da curva limite de conformação dos materiais, focando o teste de Marciniak e o Método de Elementos Finitos.

- **Capítulo 3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL E NUMÉRICO:** Neste item são descritos tanto os passos para avaliação de chapas utilizando o teste de Marciniak, com destaque para o diâmetro do furo e espessura do *dummy blank*, quanto os procedimentos para análise por elementos finitos.

- **Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES:** Apresentação dos resultados obtidos por meio do teste experimental e resultados mediante a análise por elementos finitos.

- **Capítulo 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:** Apresentam-se conclusões e sugestões de novas considerações sobre este trabalho.

- **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:** São listadas as obras consultadas e referenciadas nesta dissertação.

2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que consiste em conformar uma chapa (*blank*) à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de uma ferramenta (punção).

Para Evangelista (2000), a arte e a ciência dos processos de conformação de chapas consistem em obter as peças desejadas conforme os requisitos de projeto e de fabricação. Genericamente, seus diversos fatores influentes podem ser agrupados conforme a Figura 1. Muitas peças conformadas são vendidas a baixo custo e em mercados altamente competitivos. O custo do material pode ter uma fração elevada no custo total da peça, de modo que uma otimização na estampagem se faz necessária. Para uma boa competitividade, a margem de segurança deve ser minimizada, como é visto em setores de conformação industrial de alto nível. Nesta situação, pequenas diferenças nas propriedades de material, condições de ferramentas e lubrificação podem causar mudanças consideráveis no andamento do processo, demandando experiência e habilidade sobre a análise de falhas e o diagnóstico na conformação. Entre os vários processos de conformação de chapas, cita-se o processo de estampagem profunda, por apresentar maior complexidade de análise em termos de deformações ou de tensões.

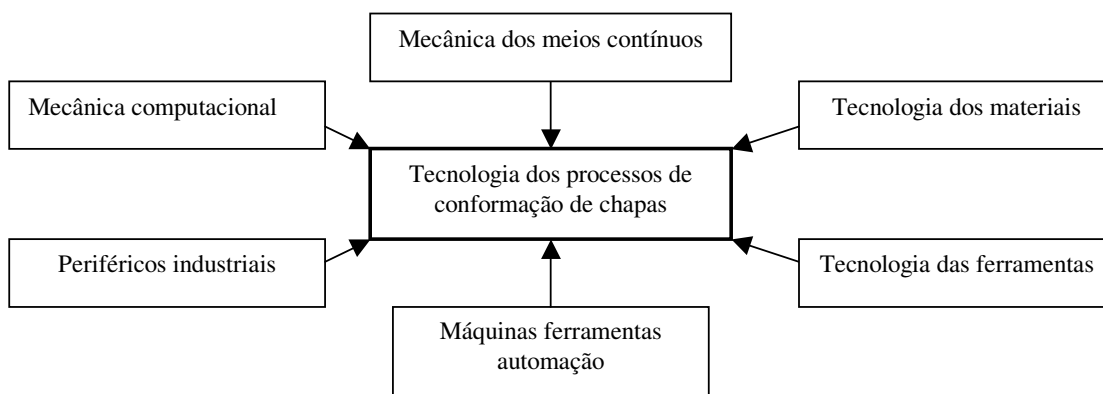


Figura 1 - Elementos diversos na tecnologia moderna de conformação de chapas (LANGE, 1997)

A complexidade da transformação da forma durante o processo, dado o grande número de variáveis envolvidas, como velocidade do equipamento, rigidez das matrizes e o atrito durante o processo, limitam a aplicação de métodos analíticos, pois a capacidade de relacionar muitas variáveis é limitada nesses métodos (BATHE, 1982; COOK et al., 1989).

Segundo Kobayashi et al (1989), os processos de conformação de chapas metálicas dividem-se em:

- Embutimento;
- Dobramento de chapas e calandragem;
- Estiramento de chapas;
- Estiramento no plano da chapa;
- Hidroconformação e conformação por elastômeros;
- Conformação a vácuo, eletromagnética, por explosão e outros.

Segundo Dieter (1981), o estiramento é o processo de conformação que consiste na aplicação de forças de tração, de maneira a esticar o material sobre uma ferramenta ou bloco-modelo. Como neste modo de deformação predominam tensões de tração, apenas em materiais muito dúcteis podem ser obtidas grandes deformações.

O estiramento constitui uma etapa de várias operações de conformação de chapas finas, como, por exemplo, na conformação de um copo de fundo hemisférico, onde a chapa é estirada sobre a face de um punção. De acordo com Dieter (1981), a maioria das estampagens complexas presentes na indústria automobilística envolvem um componente de estiramento.

A figura 2 mostra uma representação simples de uma operação de estiramento.

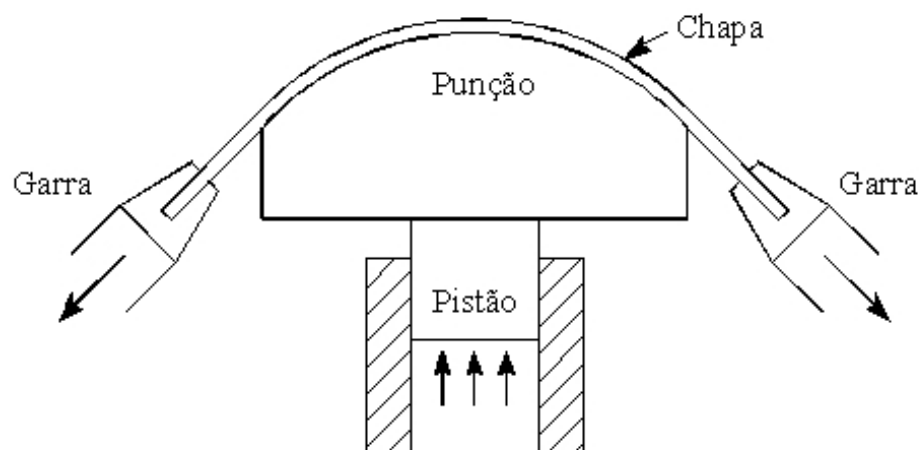


Figura 2 - Operação de estiramento por tração.

A estampagem profunda ou embutimento, por sua vez, corresponde ao processo de fabricação utilizado para modelar chapas planas em artigos com forma de copo. A estampagem é realizada colocando-se uma amostra de tamanho adequado sobre uma matriz de forma definida e comprimindo o metal com um punção para o interior desta matriz. Ainda de acordo com Dieter (1981), a maior parte dos estudos experimentais e teóricos têm sido realizados na estampagem profunda de um copo cilíndrico de fundo plano (teste de *Swift*), a partir de um disco plano (*blank*). A Figura 3 mostra representação uma operação de embutimento profundo.

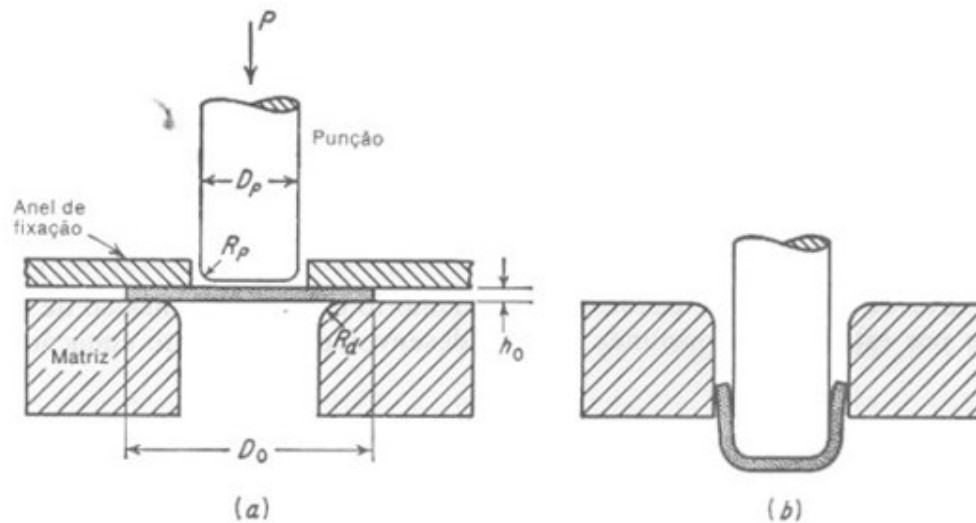


Figura 3 - Estampagem profunda de um copo cilíndrico. (a) Antes da estampagem; (b) Após a estampagem (DIETER, 1981)

Na estampagem profunda de um copo, o metal é submetido a três tipos diferentes de deformação. O metal situado no centro do disco, sob a cabeça do punção, é acomodado em torno do perfil do punção e, assim, tem sua espessura reduzida. Nesta região, o metal está sujeito a um estado biaxial de tração devido à ação do punção. O metal situado na região interna do *blank* é deformado radialmente para o interior em direção da garganta da matriz e, à medida que isto ocorre, a circunferência externa deve decrescer continuamente desde a dimensão do disco original até aquela relativa à peça final. Isto significa que o metal está submetido a uma deformação compressiva na direção circunferencial e a uma deformação por tração na direção radial. Quando o metal ultrapassa o raio da matriz, é primeiramente dobrado e depois endireitado, ao mesmo tempo que sofre um esforço de tração. Este dobramento plástico sob tração resulta numa considerável redução de espessura, que modifica o aumento da mesma produzido pela contração circunferencial. Entre a zona interna tracionada e a zona externa contraída existe um estreito anel do metal que não foi dobrado, seja sobre a matriz,

seja sobre o punção. O metal nesta região foi submetido apenas a um carregamento de tração ao longo da operação de estampagem.

Segundo Bresciani et al (1997), o processo de embutimento submete a chapa plana a um estado de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que está sendo conformada. Para peças cilíndricas, existem três diferentes estados de tensão: um na flange, um na parede lateral e um no fundo do copo, como pode ser visto na Figura 4.

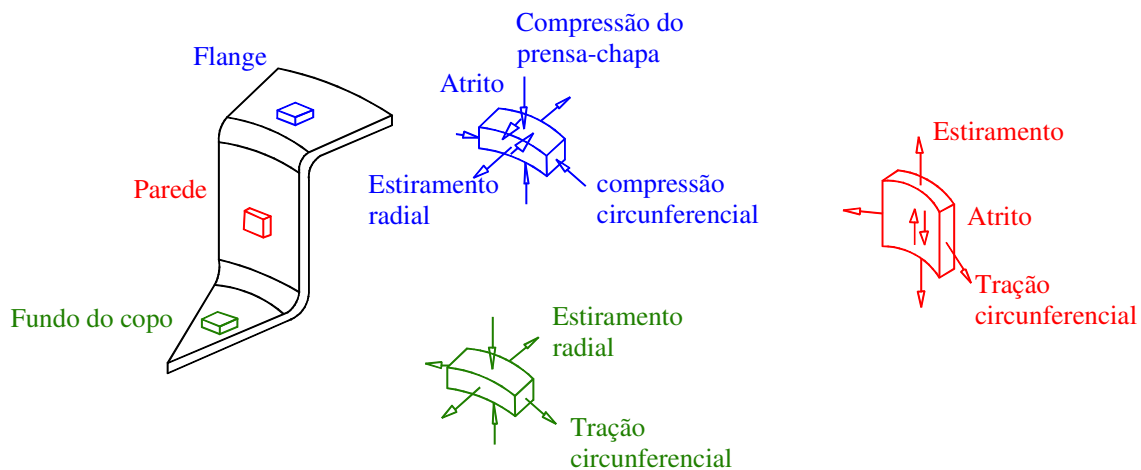


Figura 4 - Estado de deformações atuantes no copo durante o embutimento (BRESCIANI et al, 1997)

2.1 PLASTICIDADE APLICADA À CONFORMAÇÃO

Uma boa conformabilidade é caracterizada por baixos valores de tensão de escoamento e altos valores de alongação, de coeficiente de anisotropia normal e de expoente de encruamento. Tendências na indústria automotiva como redução de massa e economia de energia levam ao uso de aços de alta resistência com novo conceito: aços baixa liga, sendo *bake hardening* (BH), *interstitial free* (IF), *dual phase* (DP), *transformation induced plasticity* (TRIP) entre outros. Também para esses aços se busca uma melhor utilização das propriedades de conformação dos materiais nos processos industriais.

Para verificação das propriedades dos materiais relacionadas à deformação, muitos métodos experimentais são usados (ensaio de tração, ensaio de Erichsen, teste de Bulge, teste de Fukui, teste de Marciniak e teste de Nakazima, entre outros). O método de simulação numérica também tem se demonstrado apropriado.

Para Keeler (1968) e Kuzman (2000), a avaliação de uma chapa de metal pode ou não ser conformada sem falha, dependendo das propriedades do material, condições superficiais, tamanho e forma do *blank*, lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa chapas, projeto do punção e da matriz, e de muitos outros fatores.

Na otimização da produção, pode ser usado o método de simulação numérica por elementos finitos (MEF), que possibilita perceber a influência dos parâmetros do processo e características dos materiais numa etapa anterior a fabricação. Com a simulação numérica, pode-se ter uma considerável redução de custo.

As grandezas que podem ser utilizadas para descrever o mecanismo de deformação de um corpo, passando de uma configuração para outra por meio da aplicação de um carregamento externo, são a tensão, deformação e taxa de deformação (KOBAYASHI et al., 1989).

Considere-se o teste uniaxial de tração de um corpo de prova cilíndrico de comprimento inicial l_0 e seção de área A_0 conforme a Figura 5 e o corpo de prova é tracionado axialmente por uma força P até o comprimento l e área A , no tempo t . Da resposta do material, obtém-se curvas tensão-deformação, Tal como mostrado na Figura 5 (b)

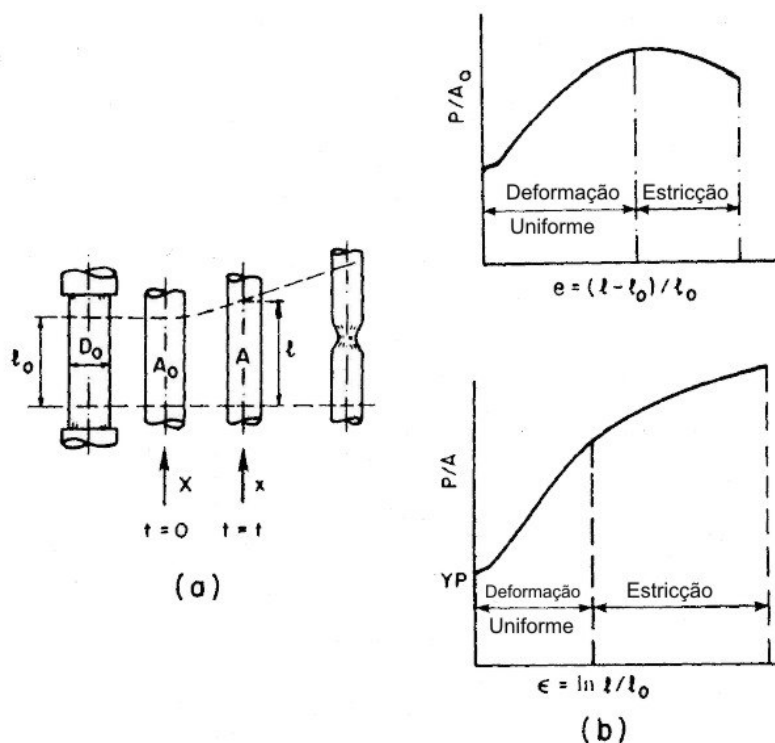


Figura 5 - Tração uniaxial. (a) Corpo de prova; (b) Curvas tensão-deformação, (KOBAYASHI et al., 1989)

2.1.1 Tensão de escoamento

Conforme Souza (1974), uma propriedade mecânica comum usada para avaliar a conformabilidade é a tensão de escoamento. Como regra geral, a conformabilidade decresce com o aumento da tensão de escoamento. Apesar desta informação poder ser verdadeira para uma variedade de classes de aços similares, processados de uma maneira similar, é uma generalização muito fraca. A tensão de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes da estricção. Uma comparação entre aço baixo carbono e aço inoxidável é um excelente exemplo. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a conformabilidade é geralmente melhor.

O início da deformação plástica é verificado em todos os metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. Segundo Souza (1974), o patamar de escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação, com variação pequena da tensão durante a sua maior parte. Depois do escoamento, o metal está encruado.

Na Figura 6, observa-se a caracterização do patamar de escoamento. A tensão A é chamada de limite de escoamento superior, que é a tensão máxima atingida antes da queda repentina da carga (começo da deformação plástica no escoamento). Após a estabilização da carga ou da tensão, o material sofre uma deformação relativamente grande sem aumento da tensão, que é o patamar de escoamento. A tensão B constante estabelecida é o limite de escoamento inferior do material e, durante o fenômeno, o alongamento que o metal sofre é chamado alongamento durante o escoamento. Alguns autores, porém, consideram o limite de escoamento inferior como a menor tensão, atingida durante o escoamento, tensão essa designada por C na Figura 6 e que pode vir a ser inferior à tensão do patamar.

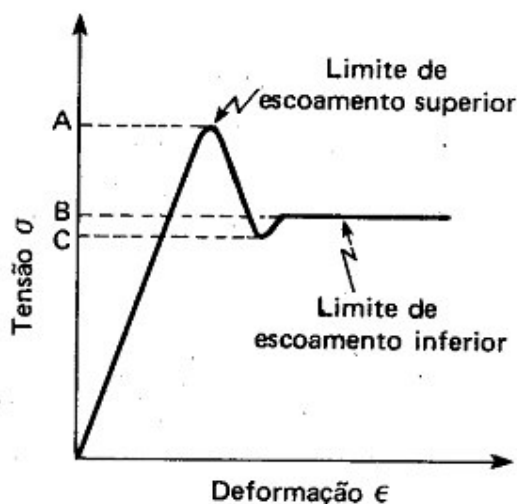


Figura 6 - Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior (SOUZA, 1974)

Esses dois limites não são constantes para um determinado metal, mas dependem de diversos fatores como a geometria e condições do corpo de prova, do método de ensaio, da velocidade de deformação, e principalmente das características da máquina de ensaio.

O limite de resistência (σ_r) é calculado pela razão entre a carga máxima atingida no ensaio e a área inicial A_0 . Para os materiais dúcteis, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial. Mesmo nesse caso, a tensão que o material sofre ao ser atingida a carga máxima é maior que o σ_r , devido à diminuição da área. O limite de escoamento, hoje em dia, é mais usado nos projetos, do que o limite de resistência, para os metais dúcteis.

Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Por ser fácil de se calcular e ser uma propriedade bem determinante, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas.

Para os metais frágeis, o limite de resistência é um critério válido para projetos, pois, nesse caso, o escoamento é muito difícil de ser determinado (como, por exemplo, para os ferros fundidos comuns) e a diminuição da área é desprezível, por causa da pequena zona plástica que esses materiais apresentam. Desse modo, o limite de resistência para os metais frágeis caracteriza bem a resistência do material.

O limite de resistência é influenciado pela anisotropia de metais trabalhados mecanicamente, se bem que em menor grau, comparativamente, ao limite de escoamento.

A carga que produz a ruptura do material é geralmente menor que a carga máxima do limite de resistência. A propriedade mecânica denominada limite de ruptura σ_f é dada pela equação:

$$\sigma_f = P_f / A_0 \quad (1)$$

onde P_f é a carga de ruptura e A_0 é a área inicial de seção transversal à carga aplicada. Quanto mais dúctil for o material, mais ele se deformará ou se alongará antes de romper, mas a carga P_f diminuirá pelo decréscimo da seção final. Além disso, a carga P_f é muito difícil de ser determinada com precisão, devido a não ser possível determinar o instante exato da ruptura, para a leitura da carga.

Quanto mais frágil o material, mais σ_f se aproxima de σ_r e, no estudo da fratura frágil, muitas vezes se menciona σ_f em lugar de σ_r .

Para ter melhor conformabilidade, um material precisa ser capaz de suportar maior deformação antes da falha ou de resistir à deformação. A experiência prática mostra duas propriedades fortemente influenciadas pela capacidade do material ser conformado. Estas duas propriedades podem ser avaliadas usando-se uma tensão padrão e tensão normal. A primeira é o coeficiente de encruamento (n). O valor de n determina a capacidade do material de ser estriccionado. A segunda propriedade é o coeficiente de anisotropia, ou coeficiente de Lankford (r). Esta propriedade controla fortemente a capacidade do material de ser embutido dentro de um copo com fundo plano.

2.1.2 Coeficiente de encruamento

Após o escoamento inicial, o estado de tensões no qual ocorre deformação plástica pode ser dependente do grau de deformação plástica atual. Tal fenômeno é chamado de encruamento. Portanto, a superfície de escoamento irá variar a cada estágio da deformação plástica, com as superfícies de escoamento subseqüentes sendo de algum modo dependentes das deformações plásticas precedentes.

Segundo Keeler (1968), um método de observação do valor de encruamento “ n ” é através da tradicional curva tensão vs. deformação convencional, obtida do teste uniaxial de tração. Na curva equivalente tensão vs. deformação verdadeira, para os valores de “ n ” inseridos na Figura 7, pode-se observar que a tensão continua a subir sem um máximo para o aumento da deformação.

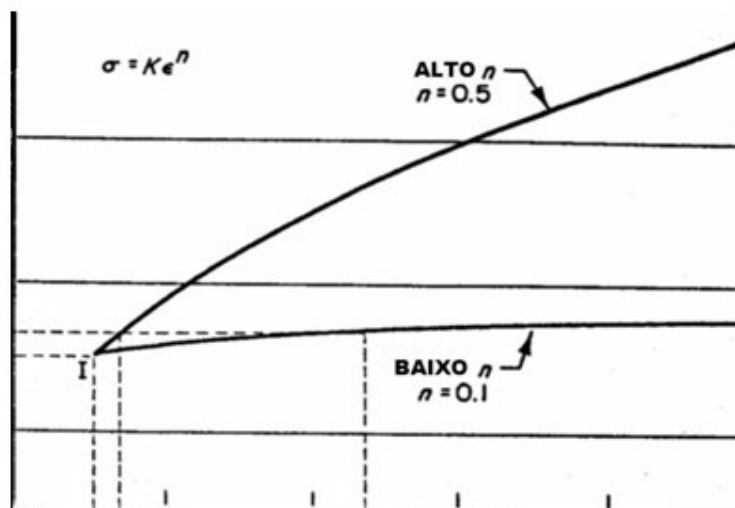


Figura 7 - A curva tensão x deformação verdadeira (KEELER, 1968)

As curvas tensão vs. deformação para muitos metais, especialmente aço, podem ser aproximadas pela equação da conservação de energia (equação de Holloman)

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (2)$$

Na equação de conservação de energia, n é definido como o expoente da relação tensão-deformação. Também chamado de coeficiente de encruamento, ele determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto maior o valor de n , mais encruável será o material e maior a resistência à estrição, fatores que são favoráveis para o processo de conformação.

Existem vários métodos para medir o valor de n . A base para a maioria é linearizar a equação da lei de conservação de energia como:

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon \quad (3)$$

Que representa uma linha reta tendo a equação $y = a + nx$ quando inseridas no gráfico log-log da Figura 8.

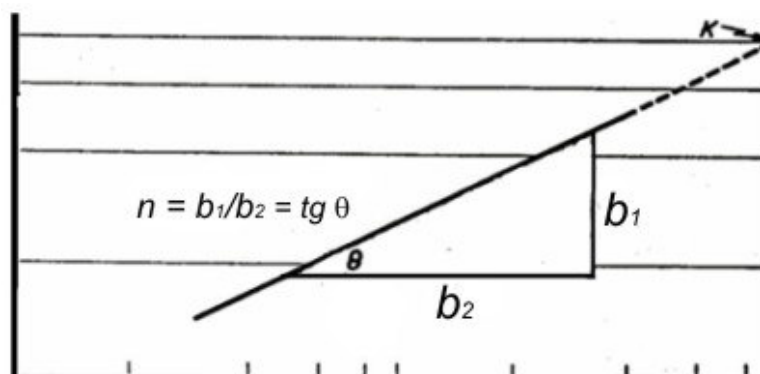


Figura 8 - Cálculo do valor de n

Se o gráfico é uma linha reta, n é uma constante e é obtido medindo-se o ângulo da reta. O valor de K é a tensão obtida pela intersecção da reta na deformação igual a 1.

Se a linha é curva, um n instantâneo precisa ser calculado para cada valor de deformação de interesse. A linha pode ter dois segmentos retos, o que ocorre para alguns aços inoxidáveis. Neste caso, cada segmento precisa ser descrito pelo seu próprio valor de n . Para a maioria dos aços baixo carbono e muitos dos não ferrosos comumente usados na conformação industrial, a constante n irá aproximar a curva tensão x deformação.

2.1.3 Anisotropia

Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento cristalino durante a deformação. Nos materiais policristalinos, os grãos tendem a girar para alguma orientação preferencial, devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura (orientação preferencial).

Freqüentemente, a anisotropia de materiais é representada pelas razões de deformação, conhecidas como *r-values* (razão de deformação plástica) ou fator de anisotropia ou coeficiente de Lankford (r) esse é obtido pela razão entre a deformação verdadeira na largura (ϵ_w) e a deformação verdadeira na espessura (ϵ_t), na região de alongamento uniforme em um corpo de prova submetido a um ensaio de tração (TAYLOR, 1988). O valor r é dado por:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right)} \quad (4)$$

Um elevado valor de r indica que o material tem boas propriedades de estampagem. O parâmetro de anisotropia r pode ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a 0, 45 e 90 graus da direção de laminação. Testando-se chapas perfeitamente isotrópicas ou não direcionais, todos os valores de r seriam iguais a uma unidade. Para a maioria dos aços e outros materiais, entretanto, há variações dos

valores de r com a direção. Essa variação de r dentro do plano da chapa, indicada na Figura 9, é chamada de anisotropia planar.

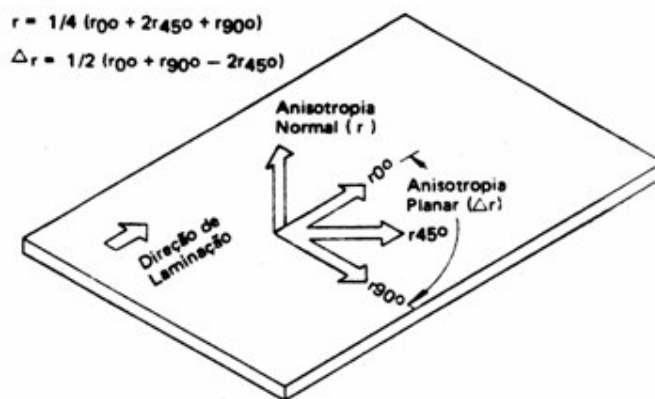


Figura 9 - Método de amostragem para obtenção de r médio e Δr (USIMINAS, 1999)

A equação matemática da anisotropia planar é expressa por:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (5)$$

O coeficiente de anisotropia planar (Δr) indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa.

Em geral toma-se o corpo de prova em várias direções em relação à direção de laminação. Normalmente, toma-se a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação, normalmente, obtendo-se assim r_{00} , r_{450} e r_{900} , como exemplificado na Figura 10.

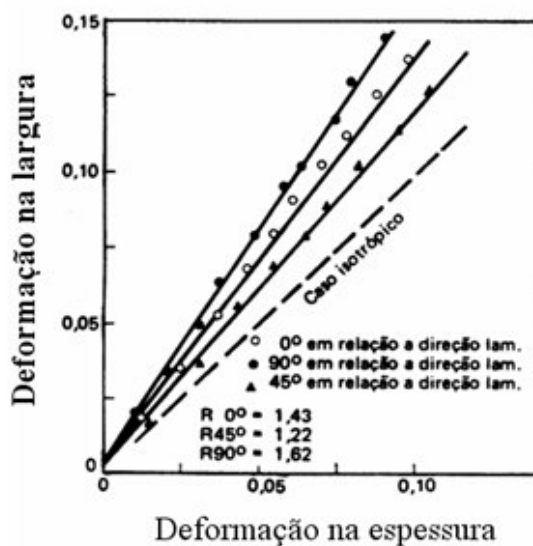


Figura 10 - Deformação na espessura versus deformação na largura (USIMINAS, 1999)

Analisando estes valores, pode-se ter os seguintes casos limites:

- Primeiro caso: $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1,0$ (isotropia total);
- Segundo caso: $r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1,0$ (anisotropia normal pura e isotropia planar);
- Terceiro caso: $r_0 \neq r_{45} \neq r_{90} \neq 1,0$ (anisotropia normal + anisotropia planar).

É de interesse notar que, no segundo caso, o material apresenta curvas tensão x deformação iguais, apesar de ser anisotrópico. Por isso, este tipo de anisotropia é difícil de ser visualizado.

É comum medir o \bar{r} médio ou anisotropia normal média pela equação:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (6)$$

Infelizmente, um material com uma anisotropia normal alta geralmente tem uma alta anisotropia planar também. Muitos fabricantes de aço estão trabalhando no problema de obter-se uma chapa de metal com alto valor de \bar{r} e um Δr com valor zero.

O grau de anisotropia é estreitamente relacionado à estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia desenvolve-se mais fortemente em metais com estrutura hexagonal (berílio, titânio, zircônio) do que em metais com estrutura cúbica de corpo centrado ou face centrada (aço, cobre, alumínio, bronze). O tipo e quantidade de elementos de liga também influenciam a natureza da anisotropia. Para um dado metal e composição, a anisotropia plástica é uma consequência de toda sua história de processamento. Especialmente importante para o aço são a temperatura de final, temperatura de resfriamento, percentual de redução à frio e ciclo de recozimento.

A influência da anisotropia é graficamente mostrada na Figura 11.

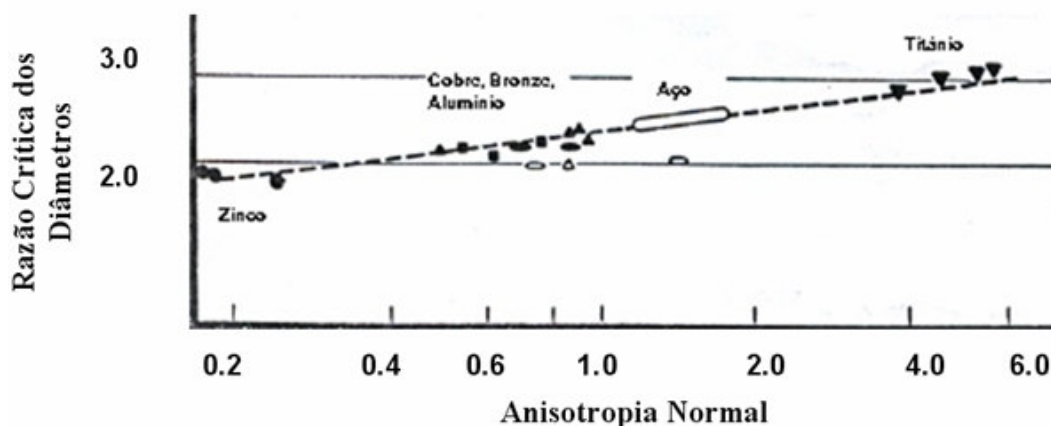


Figura 11 – Anisotropia normal para vários materiais versus RCD (Razão Crítica dos Diâmetros).
Um valor alto de \bar{r} indica boa conformabilidade (KEELER, 1968)

RCD ou razão crítica dos diâmetros (LDR: *limit drawing ratio*) consiste na razão entre o diâmetro máximo do corpo de prova que estampou sem romper pelo diâmetro do punção (D_0/d_p).

Mudando-se a anisotropia normal de 0,2 (zinco) para 6,0 (titânio), a razão crítica dos diâmetros aumenta de 2 para 3.

O coeficiente de anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. Um material isotrópico tem $\bar{r}=1$ e $\Delta r = 0$. Nos materiais para estampagem profunda um alto valor de \bar{r} é desejado (maior resistência ao afinamento da chapa). A relação entre \bar{r} e a razão limite de estampagem é mostrada na Figura 11.

Os valores de \bar{r} em aços efervescentes variam entre 0,8 e 1,2. Em aços acalmados ao alumínio, adequadamente produzidos, \bar{r} pode variar entre 1,5 e 1,8. Em alguns aços IF (*interstitial free*) \bar{r} pode ser tão alto quanto 2,2. Na direção oposta, a textura cúbica do cobre ou de aços inoxidáveis austeníticos pode originar \bar{r} tão baixo quanto 0,1.

Evangelista (2000) destaca que o valor \bar{r} influencia a profundidade média possível de ser obtida em uma operação de estampagem profunda (embutimento). O valor de Δr mede a variação de r no plano da chapa, determinando a extensão do fenômeno de *earring* (orelhas). Uma estampagem ótima é obtida pela combinação de um elevado valor de \bar{r} e um valor de Δr igual a zero.

A tendência à formação de orelhas na estampagem é função da anisotropia planar. As orelhas se formam a 0 e 90° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar (Δr) é maior que zero, e a 45° e 135° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar é menor que zero.

2.2 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Richter (2003) define a CLC como sendo uma representação do comportamento de uma chapa metálica, que é deformada em um processo de conformação mecânica e traçada em um diagrama deformação verdadeira maior vs. deformação verdadeira menor. É comum considerar que as deformações limites independam do tipo de ensaio empregado nas suas determinações e representem, portanto, uma propriedade inerente do material. Em outras palavras, assume-se que os efeitos estruturais, devido às condições de contorno do processo

de deformação, não exerçam nenhuma influência nas deformações limites. Esta é a razão pela qual a maioria dos modelos teóricos se baseia em uma análise local, onde somente as propriedades materiais devem ser definidas para se determinar as deformações limites, sob condições prescritas de carregamento.

As curvas limite de conformação (CLC), são empregadas para avaliar a severidade das deformações do material submetido a processos de conformação por estiramento, estampagem profunda, e tração. A complexidade destas deformações torna difícil a avaliação da estampagem durante a etapa industrial. Contudo, o que se faz para o controle das falhas mecânicas no processo é a comparação da distribuição das deformações das chapas com as CLCs do material, obtidas em laboratório. Esta comparação é feita durante o ajuste do ferramental ou em uma análise de ruptura da peça.

A quantia de deformação pode determinar quando o metal falhará. As áreas da chapa que estão sujeitas às maiores deformações, e, por conseqüência, as que estão mais sujeitas à fratura, são identificadas e marcadas através de linhas retas e/ou círculos que se deformam quando solicitados. As linhas de deformação são claramente visíveis depois da deformação.

O mais importante fator de qualquer sistema de linhas é o espaçamento entre as linhas. Visto que todo o material entre as linhas adjacentes é considerado como uma unidade, qualquer variação de deformação de ponto a ponto entre as linhas é indetectável. Somente uma média de deformação pode ser obtida. Portanto, as linhas precisam estar suficientemente perto uma das outras para que as diferenças localizadas possam ser detectadas.

O Diagrama Limite de Conformação é comumente utilizado como um método de visualização do limite de deformação dos materiais, no qual pares deformação maior vs. deformação menor são inseridos, gerando vários pontos em um gráfico. No diagrama, pode-se perceber, do lado direito as deformações maior e menor positivas por Keeler e Backofen (1963) e, do lado esquerdo, a deformação maior positiva e a deformação menor negativa por Goodwin (1968). Tem-se diferentes combinações com as deformações maior e menor através da relação (ϵ_1/ϵ_2), que varia de tensão uniaxial ($=-2$) no embutimento, passando por estado plano ($=0$), a deformação biaxial ($=1$) no estiramento.

Conectando os pontos máximos da relação deformação maior e deformação menor, a curva limite de deformação (CLC) é obtida. As falhas ocorrem acima dessa linha, enquanto abaixo dela, teoricamente, tem-se conformação sem falhas. A dispersão dos valores medidos e traçados no diagrama podem ser muito grande (Figura 12), o que não se deve

apenas à medição, mas também às propriedades intrínsecas do material. A aproximação da CLC é, dessa forma, um processo que pode ser subjetivo (WU e GEERS, 2006).

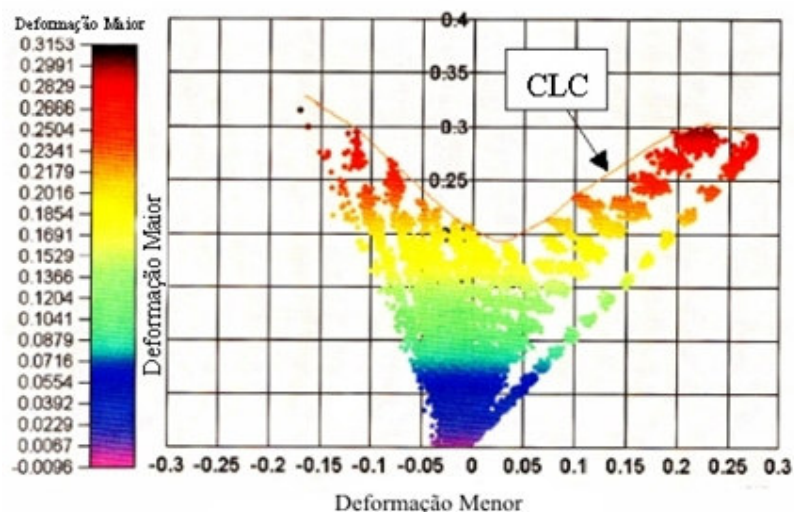


Figura 12 - Diagrama limite de conformação (WU E GEERS, 2005)

Segundo Wu e Geers (2006), os diagramas limite de conformação são utilizados para indicar a conformabilidade dos materiais, ou, na comparação entre materiais, para definir qual o melhor a ser utilizado. Os DLCs servem também de parâmetros de comparação com cálculos de elementos finitos, conforme Figura 13. Quando conhecidas as deformações maior e menor, elas são comparadas com a CLC e as mesmas não devem excedê-la. Como segurança, é utilizada uma margem de 10% abaixo da curva limite para garantir estampados sem falhas.

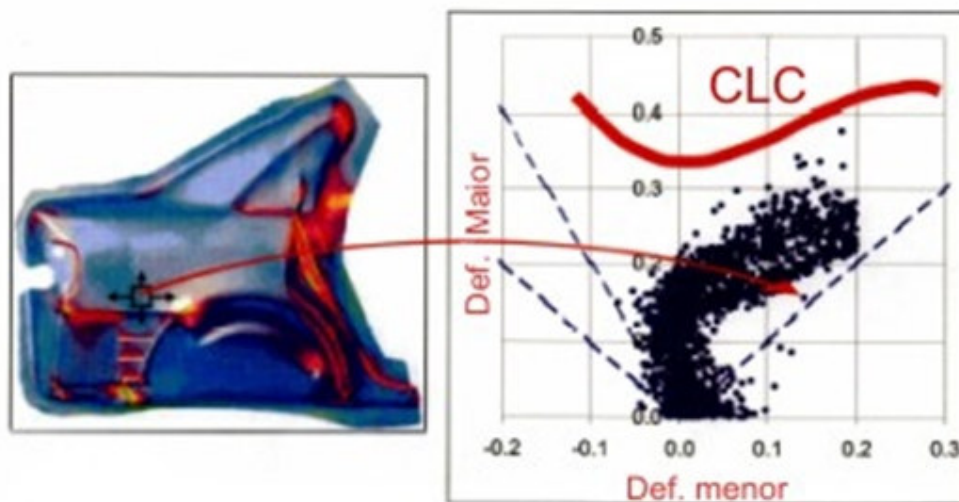


Figure 13 - Aplicação da curva limite de conformação

Keeler (1968) faz uma representação dos testes de embutimento profundo e estiramento, como mostram as Figuras 14 e 15, respectivamente, indicando não apenas a região de deformação da chapa, mas também a forma de ruptura do material em cada caso.

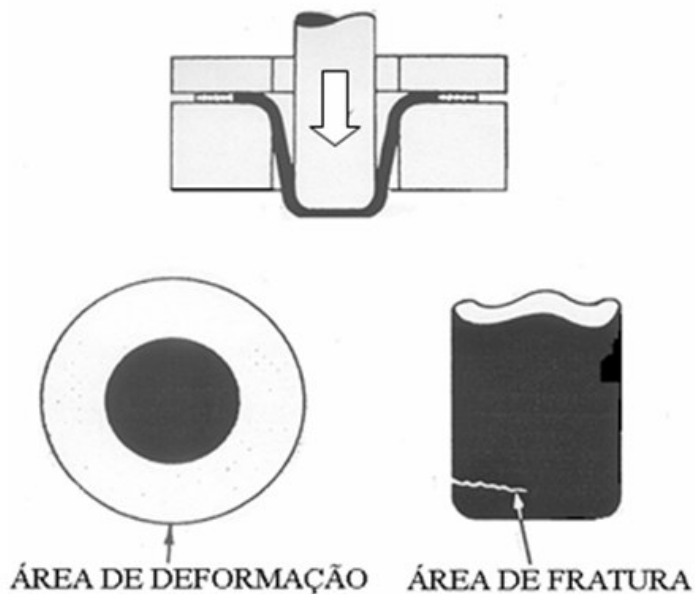


Figura 14 - Operação de embutimento profundo (KEELER, 1968)

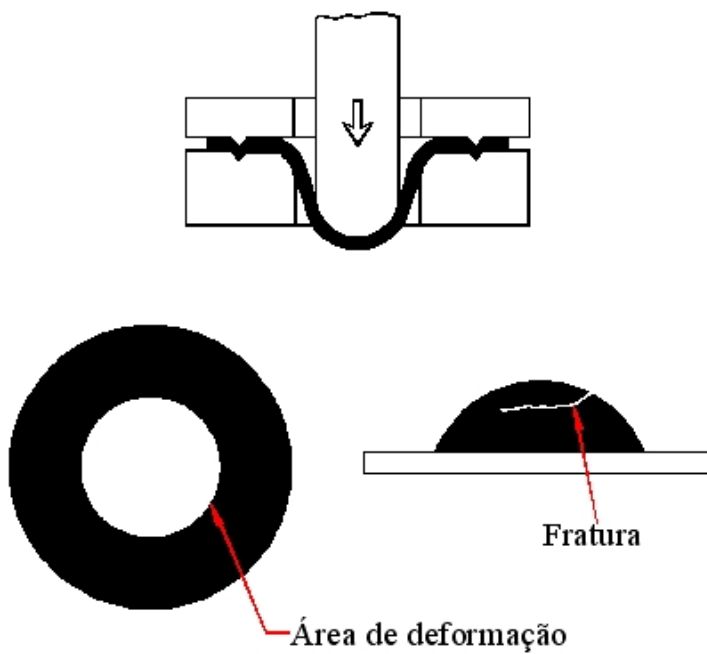


Figura 15 - Operação de estiramento (KEELER, 1968)

Marciniak e Duncan (1992) associaram conjuntos de pontos (ϵ_1 , ϵ_2) de uma chapa sob conformação mecânica com os tipos de defeitos possíveis em um diagrama geral, mostrados na Figura 16.



Figura 16 - Representação dos possíveis defeitos na chapa em um diagrama $\epsilon_1 \times \epsilon_2$ (MARCINIAK E DUNCAN, 1992)

2.2.1 Análise de deformações via impressão de malha de círculos

De acordo com Moreira *et al* (2003), as deformações limites são geralmente determinadas realizando-se o ensaio até a aparição de uma fratura dúctil e, em seguida, analisando a distribuição de deformações obtida na vizinhança da zona fraturada. As deformações são usualmente obtidas através de medidas efetuadas na malha de círculos impressa na superfície da chapa ensaiada. A metodologia proposta por Hecker (1972) define as deformações limites como valores limites entre as deformações principais das elipses que apresentam uma estricção ou uma fratura e de elipses em zonas adjacentes isentas da estricção ou da fratura. Uma outra metodologia, introduzida por Veerman (1972), é baseada na determinação de uma mudança abrupta na evolução da maior deformação principal de uma elipse que irá sofrer uma fratura. Esta metodologia requer o levantamento do histórico completo de deformação durante o ensaio, isto é, a aquisição via análise de imagens de deslocamentos impostos à malha de círculos.

De acordo com Srour (2002), escolhida uma elipse adequada para a medição das deformações, tem-se, no diâmetro maior da elipse, a maior deformação principal

convencional, e no menor diâmetro, a menor deformação principal convencional. As deformações convencionais e as verdadeiras são calculadas através das seguintes equações:

$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (8)$$

$$e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (10)$$

onde: D_0 é o diâmetro inicial do círculo, D_1 é o diâmetro maior final da elipse, D_2 é o diâmetro menor final da elipse. A Equação (7) refere-se à deformação maior convencional, a Equação (8) é a deformação maior verdadeira, a Equação (9) refere-se à deformação menor convencional e a Equação (10) à deformação menor verdadeira.

Para medir os diâmetros e calcular as deformações, são utilizados escala graduada ou paquímetro. No caso de medição da elipse do lado da fratura, a medida do diâmetro final maior da elipse é acrescida da largura da fratura. Para fazer o cálculo correto da deformação, utiliza-se medir o comprimento final de cada borda da elipse, entre a fratura e a ponta da curva. O diâmetro menor da elipse não é alterado pela presença da fratura, sendo possível medir a deformação diretamente. Depois da medida das deformações de engenharia, deve-se fazer a conversão das deformações para a unidade verdadeira e assim plotar a CLC experimental.

A Figura 17 mostra um procedimento de medição da malha de círculos após a deformação do material.

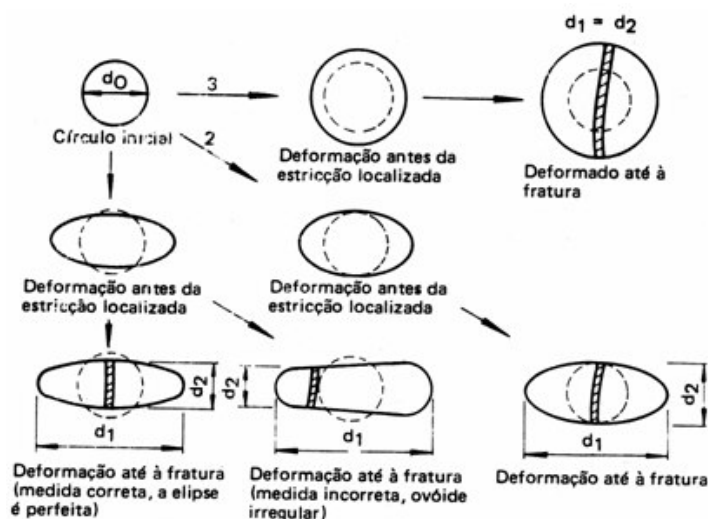


Figura 17 - Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais (USIMINAS, 1999)

Lange (1993) faz uma representação do Diagrama Limite de Conformação, mostrando o tipo de deformações sofridas pelo material para uma malha circular impressa na chapa, tanto no estiramento quanto no embutimento profundo, conforme apresentado na Figura 18.

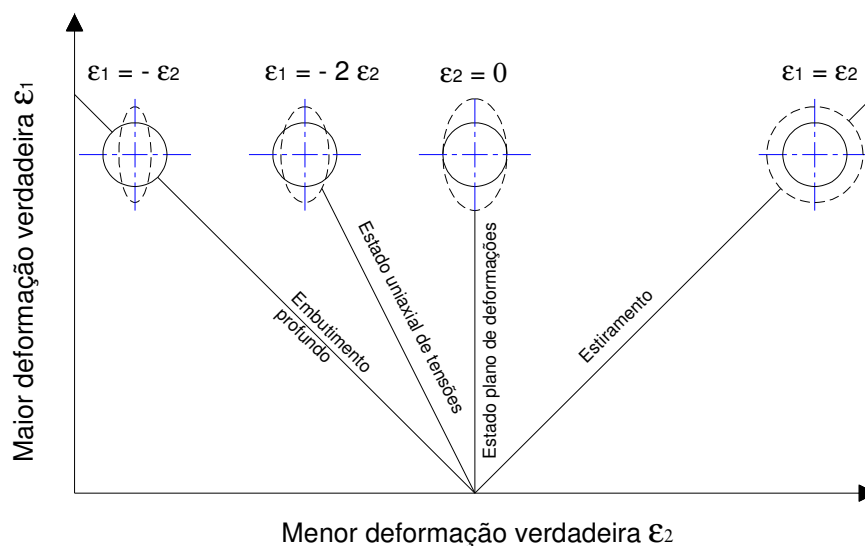


Figura 18 - Deformações no embutimento profundo e no estiramento para uma malha circular (LANGE, 1993)

Keeler (2003) realizou estudos de caso para os quais foram realizados cálculos envolvendo a constância de volume do material deformado, tanto para as deformações de engenharia (convencionais) quanto para as deformações verdadeiras da chapa estampada, como mostram as equações (11) e (12):

$$(e_1 + 1) * (e_2 + 1) * (e_3 + 1) = 1 \quad (11)$$

$$(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) = 0 \quad (12)$$

onde e_3 é a deformação convencional no sentido da espessura da chapa, ou seja, representa o afinamento do material e ϵ_3 representa a deformação verdadeira na espessura do material.

2.2.2 Ensaios de conformabilidade

De acordo com Sampaio et al (2003), uma maneira tradicional de se avaliar a aptidão dos materiais à conformação é através de ensaios experimentais, como os ensaios Swift, Erichsen, Olsen, Fukui, entre outros. Uma classificação destes testes de estampagem, de acordo com o modo de deformação, é feita pelo fascículo de informações técnicas da Usiminas (1999), como mostra a Figura 19.

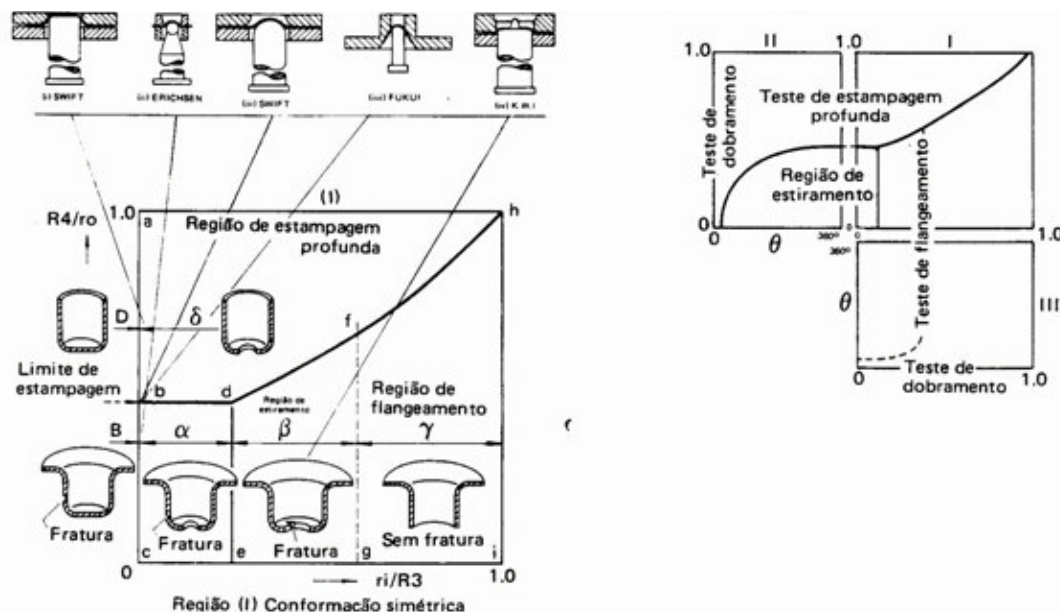


Figure 19 - Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação (USIMINAS, 1999)

Um dos métodos utilizados para a determinação da CLC é o ensaio IRSID, o qual, segundo o fascículo de informações técnicas da Usiminas (1999), é realizado por meio de ensaios de tração, com corpos de prova com entalhes variados, e ensaios de embutimento Erichsen e Swift. A Figura 20 mostra a curva limite de conformação segundo o método IRSID.

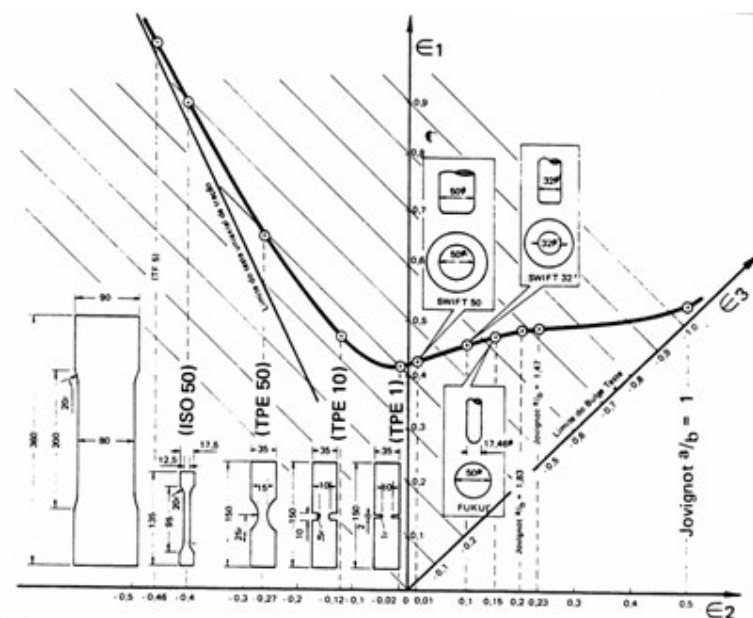


Figure 20 - Curva limite de conformação de acordo com o método IRSID (USIMINAS, 1999)

Segundo Moreira *et al* (2003), existem na literatura muitos ensaios experimentais destinados a determinação da CLC, como os testes uniaxiais (tração) e os testes propostos por Swift, Fukui e Erichsen, que possibilitam o levantamento da CLC. Atualmente, no entanto, a CLC é geralmente determinada com o auxílio de um ferramental simples empregando corpos de prova de diferentes larguras. Isso ocorre nos ensaios propostos por Nakazima et al (1968) e Marciniak (1967), nos quais a chapa é bloqueada em sua periferia e deformada por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak).

2.2.2.1 Teste de Nakazima

O método de Nakazima é descrito por Richter (2003) como sendo executado com um ferramental composto por um punção hemisférico, uma matriz e um prensa chapas. Segundo ele, a força aplicada no prensa chapas evita qualquer escorregamento do material do flange para a parte central do corpo de prova que está sendo deformado durante o ensaio.

A lubrificação no ensaio é feita por meio de um filme lubrificante, que pode conter uma almofada elástica, colocada com o objetivo de melhorar a distribuição das deformações. As Figuras 21 e 22 mostram o ferramental de ensaio Nakazima e a curva limite de conformação obtida segundo este método, respectivamente.

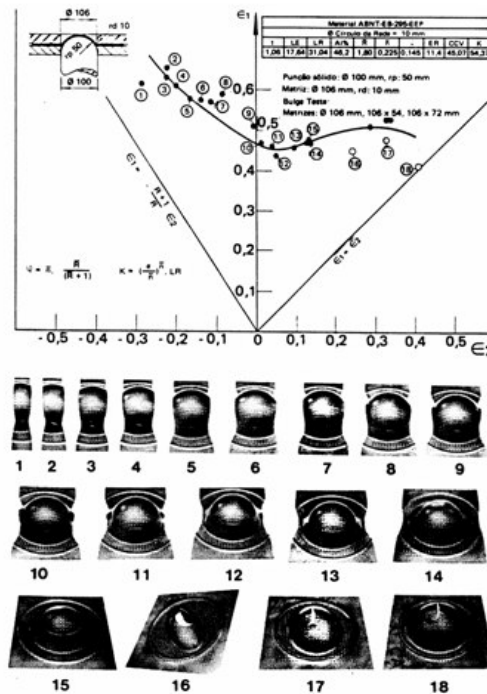


Figura 21 - Curva limite de conformação segundo o método Nakazima (USIMINAS, 1999)

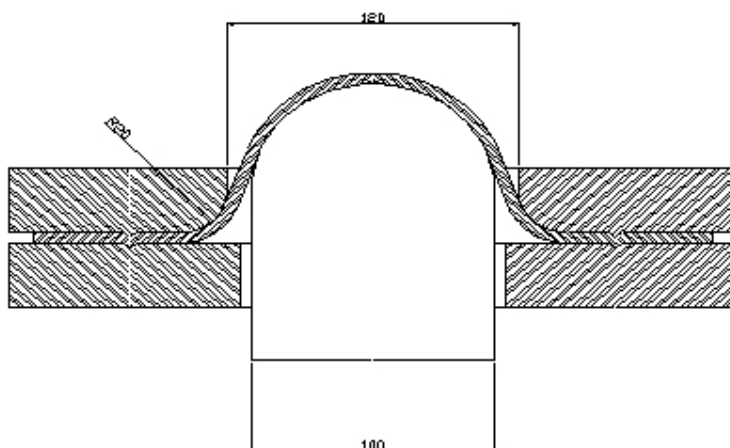


Figura 22 - Ferramental utilizado para execução do teste de Nakazima (RICHTER, 2003)

No teste de Nakazima que foi realizado por Chemin (2004), foram confeccionados corpos de prova a partir de uma chapa de aço DC 06, com 0,7 mm de espessura, a partir da qual se levantou a CLC. Ao todo, foram utilizados 10 corpos de prova com diferentes dimensões, a fim de se produzir desde o modo de deformação por estiramento a embutimento profundo. Estas dimensões dos corpos de prova variaram desde 200 x 200mm até 200 x 40mm. A Figura 23 mostra as diferentes geometrias das chapas utilizadas no ensaio de Nakazima por Chemin.

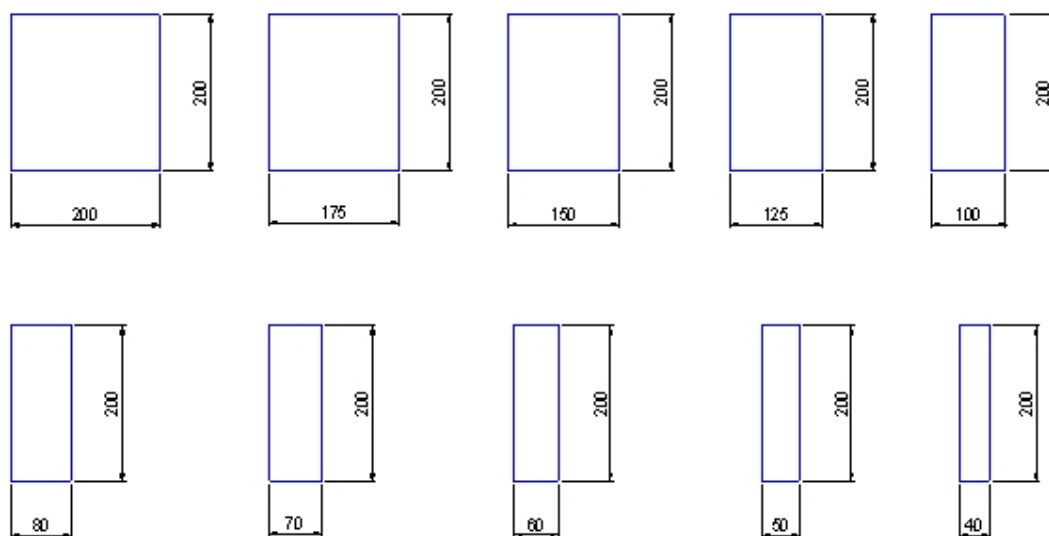


Figura 23 - Corpos de prova de diferentes larguras (CHEMIN, 2004)

Chemin (2004) realizou o ensaio de Nakazima até a ruptura do corpo de prova, a qual geralmente ocorre em apenas um dos lados do copo estampado, sendo medidas as elipses localizadas no lado oposto à ruptura do copo estampado.

O aço DC 06 foi caracterizado com o teste de Nakazima e a curva CLC do mesmo é mostrada na Figura 24.

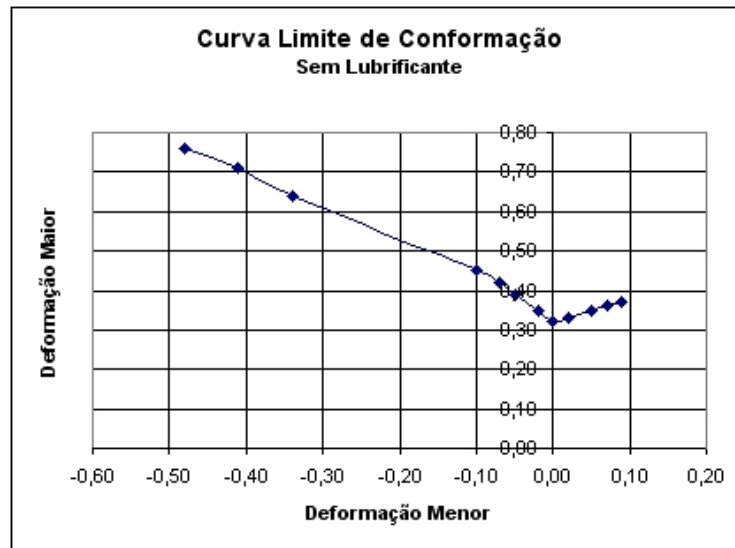


Figura 24 - Curva CLC do aço DC06 com teste de Nakazima (CHEMIN, 2004)

Tigrinho (2005) realizou ensaios com o aço DC06 e estudou uma possível solução para se obter um maior perfil da CLC no estiramento. Essa solução seria a utilização de um lubrificante para melhorar a estampagem, o que, teoricamente, diminuiria o atrito entre o punção e a chapa, aumentando a conformabilidade do material e, conseqüentemente, as deformações ϵ_1 e ϵ_2 que geram a CLC.

Com base neste conceito, foram realizados novos ensaios, apenas com o corpo de prova com 200 x 200 mm (que simula o modo de deformação por estiramento), aplicando-se vários óleos lubrificantes utilizados pela indústria automotiva na estampagem de peças da carroceria dos automóveis. Estes óleos não apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios, ou seja, não conseguiram reduzir o atrito entre o punção e a chapa, a ponto de gerar um maior perfil da CLC no estiramento.

A solução encontrada foi a utilização de um filme de poliuretano que, aplicado entre a ferramenta e a amostra, gerou uma maior deformação da chapa, principalmente na cabeça do punção, gerando pontos com uma deformação ϵ_2 superior ao nível máximo atingido nos ensaios anteriores de Chemin (2004). A Figura 25 mostra a CLC do aço DC 06 obtida

sem lubrificante e, sobrepostos a essa curva, os pontos de maior deformação obtidos nos ensaios com o filme de poliuretano aplicado à amostra de 200 x 200mm.

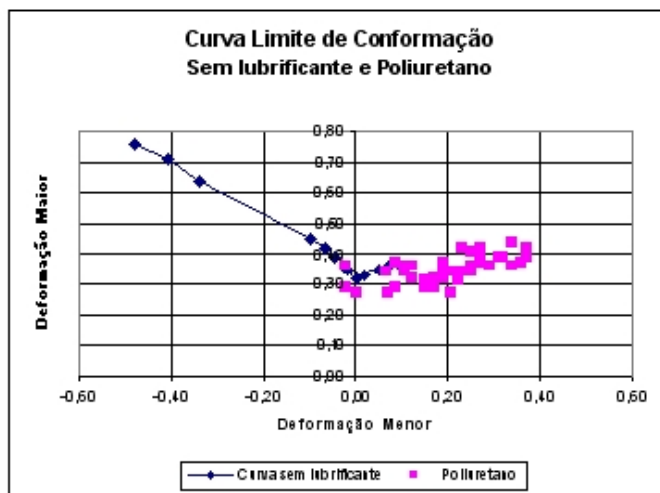


Figura 25 - Pontos de máxima deformação atingidos com o filme de poliuretano (TIGRINHO, 2005)

Pelos pontos mostrados na Figura 25, que representam a máxima deformação atingida com o filme de poliuretano, nota-se que este agente lubrificante conseguiu gerar pontos com uma maior deformação ϵ_2 , com valores próximos a 0,40, ao passo que, sem lubrificante, este nível não chegou a 0,10 de deformação para o eixo menor ϵ_2 . Estes resultados mostram o ganho real obtido em termos de estampabilidade do material com este lubrificante.

Para cada uma destas condições de ensaio, sem lubrificação e com o poliuretano, pôde-se levantar uma curva limite de conformação final, com um perfil bem desenvolvido tanto para o embutimento profundo quanto para o estiramento, como mostra a Figura 26.

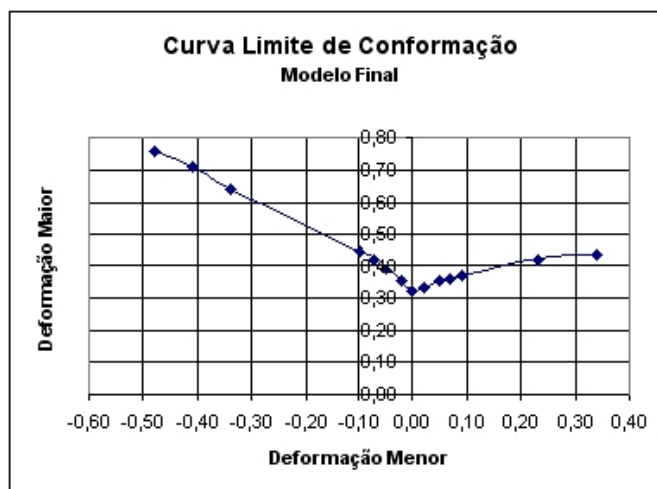


Figura 26 - Modelo final curva limite de conformação do aço DC 06 (CHEMIN, 2004)

Pela comparação dos resultados mostrados na Figura 26, pode-se notar que a utilização do lubrificante realmente aumenta o perfil da CLC gerada para o estiramento, uma vez que, com lubrificante, se atingiu uma deformação de aproximadamente 0,35 para ϵ_2 , enquanto que, sem o filme lubrificante, este valor limitou-se a aproximadamente 0,9. Na Figura 25, pode ser observado que os pontos obtidos com o poliuretano, que se posicionaram próximos ao estado plano de deformações até o final da curva sem lubrificação, não geraram uma maior deformação ϵ_1 (os pontos de máxima ficaram sobrepostos à curva sem lubrificante). Portanto, o que se conseguiu foi apenas aumentar o perfil da curva para um maior nível de deformação ϵ_2 , seguindo a mesma curvatura da CLC sem lubrificante. Com base nisto, Chemin (2004) afirma que o lubrificante gerou uma distribuição mais uniforme das deformações no plano da chapa, atingindo, conseqüentemente, maiores níveis de deformações para o estiramento.

2.2.2.2 Teste de Marciniak

Richter (2003) destaca também que os experimentos mais utilizados para a determinação da curva limite de conformação são os métodos de Nakazima e Marciniak. O autor descreve o ferramental utilizado nos ensaios, de forma que o teste conforme Marciniak é composto por um punção cilíndrico, uma matriz e um prensa chapas. A força aplicada no prensa chapas evita qualquer escoamento do material do flange para a parte central do corpo de prova que está sendo deformado durante o ensaio, como mostra a Figura 27.

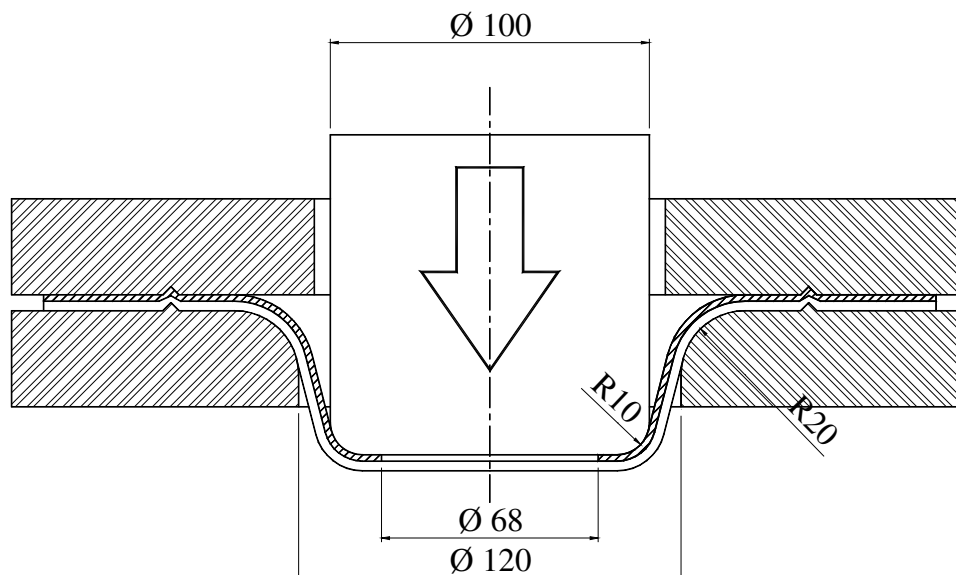


Figura 27 - Ferramental utilizado para execução do teste de Marciniak (FLC CLUB, 2003)

Os corpos de prova utilizados no teste segundo Marciniak são tiras de chapas retangulares com diferentes larguras, que são cortadas de forma que a direção longitudinal delas seja ortogonal ao sentido de laminação da chapa, maneira análoga ao ensaio de tração. Ainda segundo Richter, a preparação dos corpos de prova compreende a aplicação de uma grade de medição em cima da superfície da chapa, de forma a não influenciar na sua conformabilidade. Em chapas de aço, a malha de círculos é aplicada a partir de um processo eletroquímico, apesar de Moreira *et al* (2003) e o próprio Keeler (1968) proporem um método de marcação por pintura.

Voltando à descrição do ensaio de Marciniak, Richter (2003) destaca que entre o próprio corpo de prova e o punção fica ainda uma chapa perfurada na parte central, para que se reduza o atrito com a face frontal do punção. Esta chapa é chamada *dummy blank* ou *driving blank*. Entre o corpo de prova e o *dummy blank* não há lubrificação nenhuma para maximizar o atrito e evitar movimento relativo, enquanto que, entre o punção e o *dummy blank* há lubrificação com óleo para diminuir o atrito e facilitar o escoamento.

Durante o ensaio, a chapa é deformada até ocorrer a primeira trinca no material do corpo de prova, de forma que, para que o ensaio seja válido, torna-se necessário que o corpo de prova trinque mais ou menos no centro do punção, que o *dummy blank* não esteja trincado e que o punção não chegue a passar pelo furo do *dummy blank* (ou seja, que o punção não entre em contato com o corpo de prova).

2.3 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Para prever-se o desempenho de componentes mecânicos, o projetista dispõe hoje de uma série de ferramentas matemáticas que podem ser aplicadas. Soluções analíticas podem ser usadas em certos casos, mas sua aplicação é limitada a situações específicas em que uma solução matemática da estrutura pode ser encontrada. Uma maneira mais abrangente de tratar problemas estruturais consiste no uso de métodos numéricos de análise. Apesar de tais métodos fornecerem soluções aproximadas, em muitos casos é a única maneira que os projetistas dispõem para encontrar as respostas que procuram.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) considera a região do problema como formada por pequenos elementos interconectados entre si. Essa região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos predefinidos. Estes elementos podem ser colocados juntos em um grande número de

diferentes configurações, modelando formas geométricas bastantes complexas. Além disso, possibilita que o projetista tenha boas possibilidades no modo de aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado em análises estruturais nos dias atuais.

O MEF é aplicável a uma grande faixa de problemas de valores de contorno em engenharia. Em um problema de valor de contorno, uma solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos desta região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

O processo de análise por elementos finitos é esquematizado na Figura 28. A idealização de um problema físico por um modelo matemático requer hipóteses que conduzem a um conjunto de equações diferenciais que governam este modelo. Sendo o MEF também um conjunto de procedimentos baseados em métodos numéricos, é necessário considera a precisão da solução.

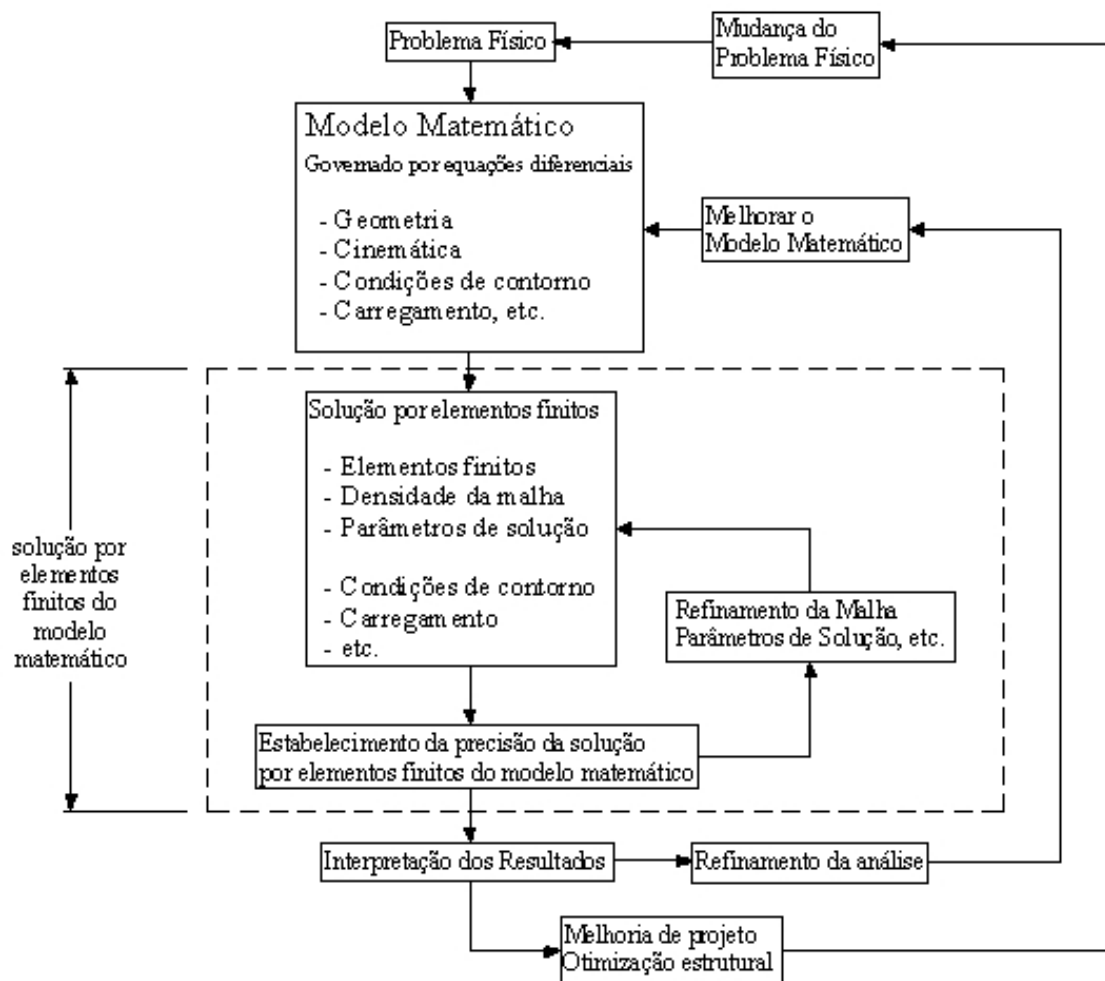


Figura 28 - Processo de análise por Elementos Finitos (BATHE, 1996)

De acordo com Huebner (1982), o método pode ser sumarizado basicamente em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento :

Pré-Processamento (*preprocessing*) → É a etapa de preparação do problema para posteriormente solucioná-lo. É nesta fase que se faz a modelagem do fenômeno, assumindo-se hipóteses, condições iniciais, condições de contorno e carregamentos, assim como a escolha do elemento, das propriedades dos materiais e da geometria que representará a forma do componente a ser analisado.

Solução (*solver*) → A solução do problema tem como ponto de partida o modelo configurado na etapa anterior. Portanto, a exatidão das respostas depende basicamente da capacidade do engenheiro em abstrair o fenômeno. A solução é baseada em um algoritmo numérico que visa solucionar da maneira mais rápida e exata uma equação diferencial, com condições de contorno e/ou condições iniciais impostas pelo modelo.

Pós-Processamento (*postprocessing*) → Esta é a última etapa. Nela, analisam-se os casos vindos das necessidades do engenheiro que modela o problema. Ou seja, ela é o conjunto solução da equação diferencial que descreve o fenômeno em estudo, sendo que em problemas mecânicos pode ser apresentada por:

- Deslocamentos nodais;
- Deformações da geometria;
- Gradientes de tensão;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamentos nodais ao longo do tempo;
- Frequências naturais e modos de vibrar da estrutura.

Esses recursos implementados computacionalmente permitem estimar a solução de um problema complexo em um tempo relativamente pequeno, fazendo com que se otimize o tempo de desenvolvimento de projetos de materiais isotrópicos ou anisotrópicos sujeitos a carregamentos estáticos, térmicos, dinâmicos e outros.

2.3.1 Aplicação do MEF aos processos de conformação

Em processos práticos de conformação mecânica, um bom número de operações (pré-formação) é necessário para transformar uma geometria “simples” inicial em uma geometria “complexa”, mantendo-se as propriedades e tolerâncias desejadas. Para isso, um método de análise que pode tratar das condições de contorno de matrizes é necessário para

aproveitar completamente as vantagens do método dos elementos finitos na análise de conformação.

Makinouchi (1996) fornece uma breve descrição dos principais métodos de análise existentes:

1. Método dos Elementos Finitos com formulação de material Rígido-Plástica ou Rígido-Viscoplástica: a condição assumida de formulação de material rígido-plástica ou rígido-viscoplástica implica no fato de a tensão de escoamento ser uma função da deformação, taxa de deformação e temperatura, sendo a resposta elástica do material ser desprezada. Esta condição é bem razoável na análise dos problemas de conformação, pois a porção elástica da deformação é desprezada na maioria das vezes. A formulação rígida-viscoplástica tem vantagens práticas significativas: primeiro, ela reduz o esforço e tempo computacional exigidos para a simulação de escoamento de material; segundo, ela estima as tensões σ , deformações ϵ , taxas de deformação $\partial\epsilon$, velocidades V e temperaturas T com precisão suficiente para propósitos práticos. Devido à desconsideração da região elástica do material, não é possível calcular a deformação inicial da chapa na face da matriz devido ao seu peso e o efeito *springback* após a conformação.

2. Método dos Elementos Finitos com formulação de material Elasto-Plástica:

A) Abordagem estática implícita : considerando-se que o processo de estampagem não é realmente um processo de impacto, assume-se um equilíbrio quase estático para o processo. O esquema estático implícito de integração no tempo satisfaz este requerimento, desde que as condições de equilíbrio sejam asseguradas em cada passo de integração no tempo. Contudo, há que avaliar-se o tempo de convergência, devido principalmente à mudança do estado de atrito e contato entre a ferramenta e a chapa durante a iteração.

B) Abordagem estática explícita : de modo a solucionar a questão da convergência, resolvem-se as equações da matriz de rigidez sem iterações em cada passo de integração no tempo, limitando-se o tamanho de cada passo de modo a ser muito pequeno. Um grande número de incrementos é necessário para completar todo o processo de conformação sem acúmulo de erro, devido ao desprezo dos termos de ordem elevada na integração no tempo.

C) Abordagem dinâmica explícita: neste tipo de abordagem, as equações de equilíbrio dinâmico são a base da formulação. Tem-se a grande vantagem de não ser necessária a montagem e solução da matriz de rigidez, obtendo-se a solução para um *time step* mais rapidamente que em uma abordagem estática. Para obter-se a solução neste tipo de abordagem, o incremento de tempo deve ser limitado de maneira que a onda de dilatação não

ultrapasse nenhum elemento. É comum utilizar-se *time steps* de 10⁻⁶ segundos. Para reduzir o tempo de cálculo, a simulação é feita com o punção em velocidade aumentada, chegando-se a 100 vezes a velocidade real, o que pode conduzir a resultados não realísticos (MAMALIS et al , 1997) .

2.3.2 Formulação dos elementos finitos

De forma bastante simplificada, os elementos que formam uma malha de elementos finitos podem ser comparados a um conjunto de molas, cada uma representando um grau de liberdade dos nós do elemento. A matriz de rigidez do elemento é formada pelos coeficientes de rigidez de cada uma dessas molas, ou graus de liberdade.

Segundo Azevedo e Awruch (1999), os principais tipos de elementos utilizados na análise de problemas envolvendo chapas são:

- Elementos planos: essa formulação utiliza uma série de elementos desse tipo para aproximar uma curva. Os principais inconvenientes desse tipo de formulação são a diferença entre o comportamento de dobramento e o comportamento de membrana e dificuldades em lidar com a interface entre os elementos co-planares.
- Elementos baseados nas teorias de cascas.
- Elementos curvos obtidos pela degeneração de elementos tridimensionais sólidos (“Shell”): A degeneração dos elementos sólidos é feita com o intuito de diminuir o número de graus de liberdade do elemento e evitar inconvenientes que surgem quando os elementos sólidos são utilizados. A redução do número de graus de liberdade é realizada fundindo-se os pares de nós no sentido da espessura do elemento em apenas um.

O elemento utilizado para modelar a chapa nessa dissertação é um elemento do tipo obtido a partir da degeneração de um elemento tridimensional sólido, denominado “Shell”, vide a Figura 29.

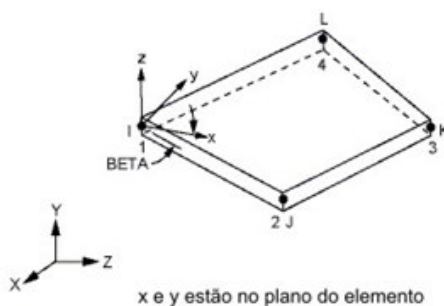


Figura 29 - Elemento tipo “Shell”

Segundo Hallquist (1998), este elemento possui 12 graus de liberdade por nó e as seguintes formulações são possíveis:

- Hughes-Liu: Este elemento utiliza um ponto de integração de Gauss, e possui controle de instabilidade numérica;
- Balytschko-Tsay: é o tipo de elemento com o qual a simulação ocorre mais rapidamente. Inclui cisalhamento transversal, e também utiliza um ponto de integração de Gauss, com controle de instabilidade numérica;
- BCIZ Triangular: é baseado na teoria de placas de Kirchhoff e utiliza três conjuntos de pontos de integração de Gauss, também possui controle de instabilidade numérica;
- C° Triangular: Este tipo de elemento é bastante rígido e não deveria ser utilizado para construir uma malha inteira, apenas a transição entre diferentes malhas;
- S/R Hughes-Liu: idêntica a formulação de Hughes-Liu, mas utiliza a integração reduzida seletivamente. Isto evita alguns modos de instabilidade numérica, mas aumenta o uso de recurso computacional em três ou quatro vezes.

Em problemas complexos de elementos finitos, a eficiência em termos de custo computacional e velocidade de análise é bastante importante. Segundo Azevedo e Awruch (1999), os elementos mais eficientes com relação a estes critérios são os elementos com funções de interpolação linear, um ponto de integração de Gauss e controle de instabilidade numérica.

Manalis et al (1997) conclui que o uso de elementos do tipo “Shell” ao invés de elementos sólidos comuns pode reduzir o tempo de processamento em até 50%, com resultados equivalentes.

2.3.3 Geração da malha

A forma de dividir o modelo a ser analisado em elementos finitos tem grande influência no resultado final da análise.

O processo de análise pelo método dos elementos finitos pode levar a resultados não confiáveis, ou até mesmo se tornar inviável, quando a malha segundo a qual o modelo foi representado se torne demasiadamente distorcida. A simulação de processos de conformação de chapas geralmente trata de problemas com grandes deformações, nos quais existem grandes chances de que a malha inicialmente proposta torne-se distorcida a ponto de invalidar

a simulação. Por outro lado, o uso de uma malha muito refinada para todo o modelo desde o início da simulação pode aumentar bastante os recursos necessários para conduzir a simulação, como tempo de processamento e memória.

Uma alternativa para a resolução deste problema é o uso do refinamento automático da malha. Esse recurso aumenta a precisão das respostas, com o mínimo de iterações possível.

O procedimento de refinamento automático da malha utiliza indicadores de erros para controlar a aproximação geométrica da malha com relação à peça que ela está envolvendo, ou ainda condições de contato inaceitáveis, como penetração entre peça e ferramenta e espessura da chapa. Durante a simulação, quando um desses indicadores atinge um nível inaceitável, a malha é refinada localmente (LEE e WANG, 2005).

Os seguintes passos são utilizados para o refinamento automático da malha:

- Atualizar a representação da malha;
- Gerar uma nova malha;
- Transferir as variáveis dependentes do histórico de deformação da malha velha para a nova malha.

Cada lado do elemento selecionado para refinamento contém um novo nó que não possui nenhum novo grau de liberdade, e a solução para o novo nó criado é obtida por interpolação linear dos nós das pontas do elemento. Moshfegh (2000) sugere dois novos tipos de indicadores para o refinamento de malhas. Esses indicadores, o gradiente efetivo de tensão e gradiente efetivo de deformação plástica, foram implementados no programa ANSYS / LSDYNA.

O indicador do gradiente efetivo de tensão compara a tensão efetiva no centro de um elemento, com a tensão efetiva nos elementos vizinhos, considerando também a distância entre o centro destes elementos. Se a comparação resultar em um alto gradiente, o elemento deve ser dividido. Ao contrário, se a comparação resultar em um gradiente baixo, a malha naquele ponto pode ser menos refinada. O indicador de gradiente efetivo de deformação plástica compara a deformação plástica a que um elemento foi submetido àquela que os elementos vizinhos foram submetidos, considerando também a distância entre os centros dos elementos. Pelo método proposto, o indicador de erro gerado deve ser balanceado com o indicador dos elementos vizinhos, de forma a produzir uma variação de deformação plástica suave.

Tristano (2003) apresenta um algoritmo para integrar várias ferramentas de refinamento de malha, em um único processo automatizado. Wan (2005) propôs um novo

método para minimização dos erros devido ao processo de representação do modelo por uma malha discreta. Porém, o método proposto, ao invés de aumentar o número de elementos na malha ou modificar as funções de interpolação dos elementos, faz uma homogeneização do indicador de erro entre os elementos da malha original.

A análise de problemas via Método dos Elementos Finitos (MEF) implica em um grande número de escolhas de parâmetros da simulação, como tipo de formulação do código sendo utilizado, tipo de elemento da malha empregado e refinamento da mesma. A escolha adequada desses parâmetros pode conduzir a resultados insatisfatórios ou a desperdício de recursos como tempo de processamento.

Dessa forma, uma análise cuidadosa dos parâmetros escolhidos, assim como a comparação dos resultados obtidos com resultados conhecidos, é aconselhada para cada problema.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado foi o DC06 DIN10152 laminado a frio, com revestimento de zinco, classificado como aço de alta estampabilidade. Este aço é empregado na conformação de peças que exigem boa resistência mecânica, por exemplo, carroceria automotiva. A composição química do DC06 é apresentada na Tabela 1. Este aço foi submetido ao ensaio de Marciniak com punção cilíndrico.

Tabela 1 - Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152

Material	Composição Química (partes da massa em %, máx.)				
	C	P	S	Mn	Ti
DC 06+ZE	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O dimensionamento e o formato adotados para os corpos de prova foram tomados a partir das normas ABNT NBR 6673, ASTM E 646 e DIN EM 10 002-1, que descrevem o ensaio. Desta forma, convencionou-se a utilização dos corpos de prova com formato “gravata”, com suas dimensões estabelecidas de forma a atender as três normas indicadas.

Os corpos de prova foram estampados (recortados), passando em seguida por uma operação de retificação da seção lateral (na região útil), com o propósito de se reduzir a incidência de sulcos ou rebarbas que poderiam acarretar pontos de concentração de tensão e mascarar os resultados obtidos. Os corpos de prova foram extraídos formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.

Ao todo, foram quatro corpos de prova para cada direção de laminação da chapa de aço DC 06 (três para se levantar o fator de anisotropia e o coeficiente de encruamento e um para a obtenção do limite de resistência). Desta forma, foi preparado um total de doze corpos

de prova da chapa utilizada para os testes de laboratório. O número de corpos de prova depende do número de ensaios, podendo variar de três a cinco para cada direção de laminação, conforme previsto pelas normas técnicas citadas anteriormente para o ensaio de tração.

Buscou-se, nestes ensaios, determinar os valores do fator de anisotropia r e coeficiente de encruamento n , além do limite de resistência, alongamento e tensão de escoamento do material. Estes dados auxiliam na avaliação das características de estampabilidade da chapa, servindo de parâmetro para análise das condições do material em relação ao grau de conformabilidade.

3.3 ENSAIOS METALOGRAFICOS

As análises metalográficas foram realizadas no Laboratório de Materiais, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

A preparação do corpo de prova seguiu o procedimento padrão de ensaio, partindo do embutimento da amostra da chapa em baquelite, sob condições controladas de pressão e temperatura; lixamento, utilizando-se quatro tipos de lixa com diferentes granulações; polimento e ataque químico, onde a amostra foi mergulhada por alguns segundos em nital (solução de ácido nítrico e álcool). Finalizado o ataque químico, encaminhou-se a amostra ao microscópio, onde se observou então a sua microestrutura.

Esta análise foi realizada com dois objetivos principais. O primeiro visou uma análise da morfologia dos grãos, o que influencia diretamente as propriedades mecânicas de cada aço e, conseqüentemente, sua estampabilidade. O segundo objetivo foi a identificação da direção de laminação da chapa, que se necessitava conhecer, uma vez que os ensaios de tração são realizados com corpos de prova recortados formando ângulos 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação do material.

A direção de laminação é caracterizada pela forma alongada dos grãos do material, sendo este o sentido que a tira percorreu entre os rolos laminadores. Esta forma alongada dos grãos se deve ao encruamento (achatamento) sofrido pelo material durante o processo de laminação, o que pode ser observado em aços laminados a frio, como no estudo em questão. Aços laminados a quente não evidenciam estas características, uma vez que, por se tratar de um processo com o material aquecido, o mesmo sofre o fenômeno de

recristalização dinâmica, fazendo com que os grãos achatados retomem um formato equiaxial, porém mais refinados que o formato inicial.

Para que fosse possível a identificação do alongamento dos grãos e, assim, determinar a direção de laminação do material, a metalografia foi realizada nas seções transversal e longitudinal de uma amostra retangular retirada do “blank” original. Esta amostra foi retirada cuidadosamente, de forma que ficasse bem alinhada com os eixos que corresponderiam aos ângulos de 0°, 45° e 90° da direção de laminação. Como esperado, a amostra apresentou o alongamento dos grãos no sentido do eixo longitudinal da chapa, sentido este correspondente a sua direção de laminação (0°), uma vez que no sentido transversal da chapa, os grãos apresentaram-se alongados para dentro do plano da seção de corte, de forma a impedir a visualização do alongamento dos grãos causado pela deformação do material durante a laminação.

3.4 ANÁLISE QUÍMICA

Com o objetivo de verificar se a composição química do material de estudo estava dentro da especificação da norma, realizou-se a análise química do material da chapa (aço DC 06). O instrumento utilizado foi um espectômetro de emissão óptica.

O equipamento em questão utiliza como fonte de excitação uma centelha de alta energia, que é criada numa fenda entre um eletrodo e a amostra do material a ser analisado. A centelha gerou uma emissão da radiação provinda da excitação superficial da amostra, com ondas características da composição elementar. O espectro da radiação foi então separado por um conjunto de prismas e lentes, em linhas distintas, de forma que a intensidade de cada linha fosse medida. Estas medidas foram precisamente convertidas em valores de concentração para cada elemento presente.

3.5 ENSAIO DE MARCINIAK

3.5.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

A prensa utilizada para os ensaios deve fornecer uma interface em que se possa obter total controle sobre a velocidade de avanço do punção, devendo esta ser constante.

Desta maneira, a prensa utilizada para execução dos ensaios foi uma prensa hidráulica. A velocidade utilizada foi de 80 mm/min.

O teste conforme Marciniak foi executado usando um ferramental composto por um punção cilíndrico, com diâmetro de 100 mm e raio de 10 mm, matriz com diâmetro de 120 mm e um prensa chapas, conforme a Figura 30.

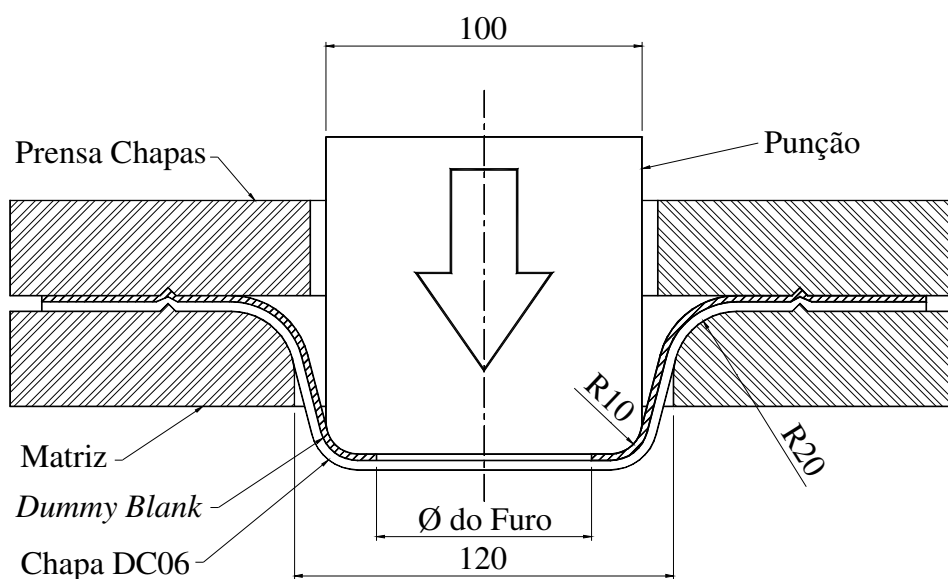


Figura 30 - Ferramental utilizado para execução do teste de Marciniak

Entre o próprio corpo de prova e o punção foi colocada uma chapa furada na parte central (*dummy blank*); assim, não houve atrito nenhum entre a face do punção e o corpo de prova. Entre o corpo de prova e o *dummy blank*, não houve lubrificação, para maximizar o atrito e evitar movimento relativo. Foi utilizado óleo sintético como lubrificante entre punção e *dummy blank*, para diminuir o atrito e facilitar o escoamento.

O material utilizado na confecção da cabeça dos punções foi o aço ferramenta D6, que apresenta elevada resistência mecânica para suportar esforços da conformação e atrito com o *dummy blank*. O corpo do punção, a matriz e o prensa-chapas foram confeccionados com aço ABNT NBR1045, pois a solicitação associada a esses componentes durante o ensaio não justificaria a utilização de um material com maior resistência mecânica.

Os corpos de prova foram tiras de chapas retangulares, com espessura de 0,8mm e com diferentes larguras, a fim de simular as condições de estiramento e embutimento. Foram cortadas de forma que a direção longitudinal deles fosse ortogonal ao sentido de laminação da chapa. As chapas de diferentes larguras são mostradas na Figura 31.

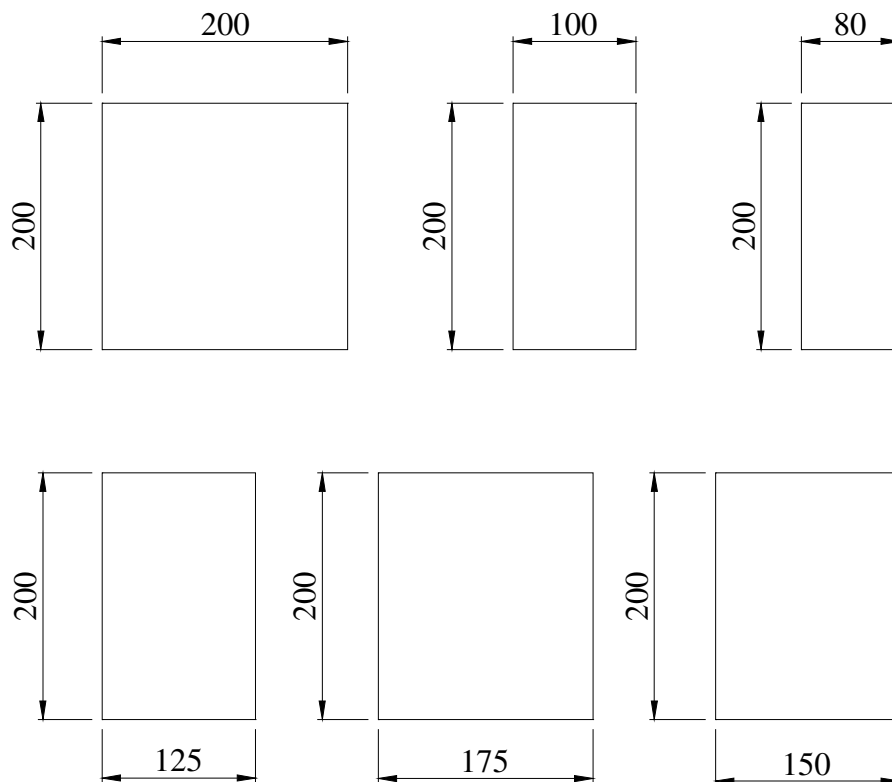


Figura 31 - Corpos de prova utilizados no ensaio de Marciniak

Foram utilizados os seis corpos de prova, sem entalhe e cortados com guilhotina. A chapa de alumínio entre o punção e corpo de prova (*dummy blank*) foi cortada na guilhotina, com as medidas dos corpos de prova e furada com corte laser.

Os casos investigados neste trabalho por meio de teste prático estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Casos estudados

Caso 1	<i>Dummy blank</i> de espessura de 0,5 mm e furo de Ø 68 mm
Caso 2	<i>Dummy blank</i> de espessura de 3 mm e furo de Ø 68 mm
Caso 3	<i>Dummy blank</i> de espessura de 2 mm e furo de Ø 50 mm
Caso 4	<i>Dummy blank</i> de espessura de 2 mm e furo de Ø 68 mm

Foi gravada uma malha de círculos na superfície da chapa (corpo de prova), com diâmetro de 4,2 mm, através de serigrafia. Trata-se de uma forma inovadora de confecção desta malha, pois geralmente ela é feita com tratamento eletroquímico, com marcação a laser ou resina fotossensível. Com a utilização de uma tela convencional de serigrafia e tinta especial para metais, reproduz-se facilmente a malha de círculos nos corpos de prova. Esse método é mais simples, de fácil aplicação e mais barato, além de não exigir equipamentos durante o processo de pintura.

Preparou-se uma tinta especial para metais, diluída com solvente e ácido nítrico a 25%, com a qual a malha, composta por círculos tangentes entre si, foi pintada sobre os corpos de prova, utilizando a tela de serigrafia com a figura da malha. Sem a adição do ácido nítrico, não há aderência da tinta sobre o metal e a marcação não resiste à deformação.

A monitoração da profundidade do copo estampado foi realizada através de uma escala eletro óptica acoplada ao punção. Desta forma, pode-se zerar o curso do punção no momento em que sua cabeça encosta no *dummy blank* e a partir daí, medir seu deslocamento com uma precisão de centésimo de mm.

O ajuste da ferramenta foi necessário para que se regulasse o alinhamento do punção de acordo com a folga existente no diâmetro da base inferior, além da necessidade de se determinar os limites de curso da ferramenta de acordo com a capacidade da máquina. Com a ferramenta em perfeita condição de uso, realizou-se então a montagem e regulagem dos dispositivos de controle e aquisição dos resultados de ensaio, sendo estes uma válvula de controle de fluxo, uma régua eletro-óptica, uma câmera de vídeo e um manômetro.

A válvula de fluxo permitiu o controle da velocidade de acionamento do punção (80mm/min). O manômetro, por sua vez, fornecia a leitura da carga exigida para a deformação do material (resistência da chapa metálica), o que permitiu, durante os testes, a percepção prévia do instante de ruptura do material. A régua eletro-óptica ligada ao êmbolo da prensa (parte que movimenta o punção) e a uma escala digital, permitiu a leitura do índice de embutimento (IE) atingido. Já a câmera de vídeo, montada dentro da base inferior da ferramenta (onde ocorria a deformação do material) e ligada a um monitor, permitiu a visualização de todo o processo de embutimento até o surgimento da trinca.

Os círculos, inicialmente com 4,2 mm de diâmetro, tomaram o formato de elipses após a deformação, sendo que o alongamento da elipse foi maior nos pontos de maior deformação.

A medição da malha dos corpos de prova foi realizada através de um gabarito plástico flexível e transparente com resolução de 0,1mm, conforme a Figura 32, pois, devido à concavidade adquirida durante o ensaio, paquímetros e micrômetros não garantiriam medidas precisas. Foram tomados os valores do eixo maior e menor das elipses formadas pela deformação do material.

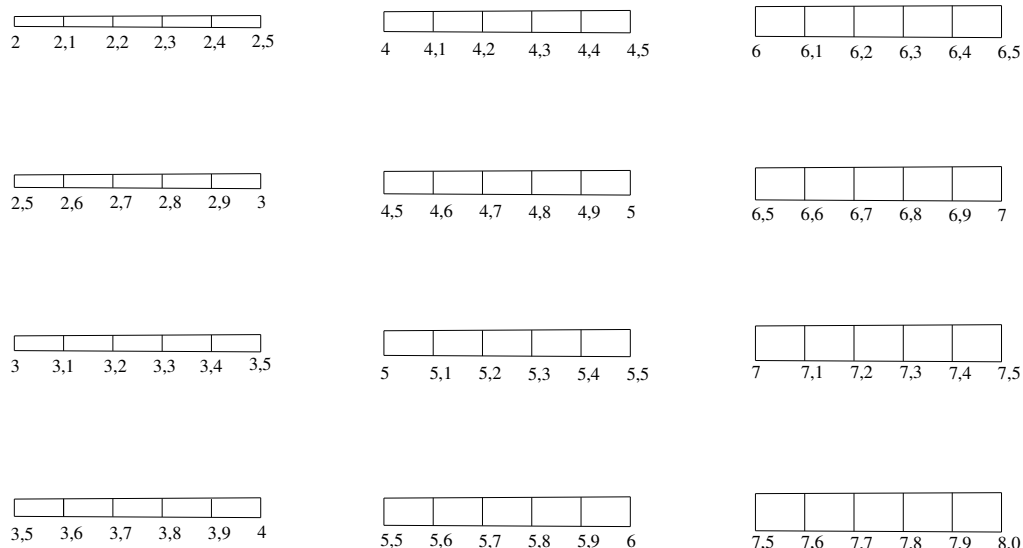


Figura 32 - Gabarito plástico flexível e transparente

O processo de medição dos corpos de prova foi realizado no lado contrário à trinca, na mesma latitude e nas faixas imediatamente superior e inferior à linha fraturada;

A partir dos valores do eixo maior e menor de cada elipse medida, foram então calculadas as deformações convencionais maior e menor, e_1 e e_2 , respectivamente. Com estes valores, foram calculadas as deformações verdadeiras ε_1 e ε_2 e assim foi possível o levantamento da CLC do material, para avaliação do efeito do *dummy blank*.

3.6 PROCEDIMENTOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.6.1 Pré-processamento

Na simulação numérica, tomou-se por referência o ensaio de Nakazima, que também serviu de comparação para os ensaios práticos de Marciniak.

A geometria de Nakazima foi modelada com os quatro corpos envolvidos na conformação: punção, matriz, prensa-chapas e chapa. Na Figura 33, podem ser vistos os componentes da ferramenta que foram modelados para simulação, e na Figura 34, são mostrados os componentes já modelados.

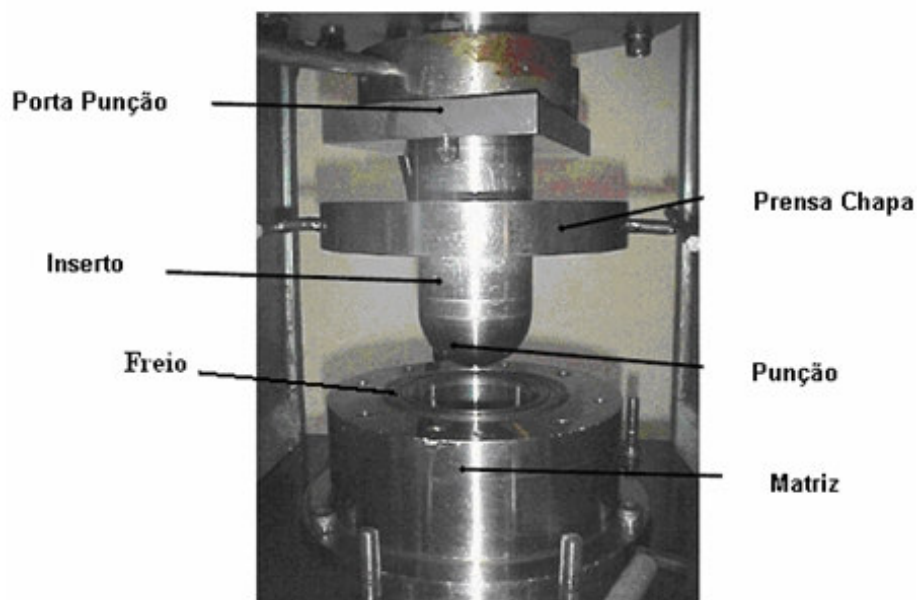


Figura 33 - Ferramenta para ensaio de Nakazima (Chemin, 2004)

Como o problema é simétrico, apenas um quarto da geometria de cada componente foi construído. O punção possui o formato hemisférico e corresponde ao formato original do punção para o ensaio de Nakazima.

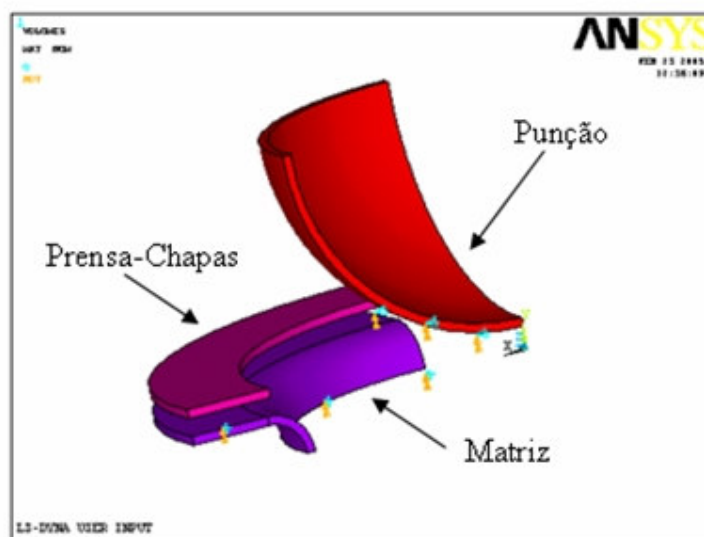


Figura 34 - Modelamento do punção e matriz

3.6.1.1 Condições de contorno e carregamento

A matriz e o punção foram definidos como corpos rígidos. Esse tipo de definição permite que todos os graus de liberdade dos nós sejam ligados ao seu centro de gravidade, de forma que o mesmo possua apenas seis graus de liberdade, independentemente do número de nós.

Considerando o plano formado pelos eixos x e z como paralelo à chapa (Figura 35), foram aplicadas as seguintes restrições de movimentação para o punção, matriz e prensa-chapas:

a) Punção e prensa-chapas:

- movimento nos eixos x e z igual a zero;
- rotação sobre o eixo x , y e z igual a zero.

b) Matriz :

- movimento nos eixos x , y e z igual a zero;
- rotação sobre o eixo x , y e z igual a zero.

Quanto às condições de contorno da chapa, o prensa-chapas será substituído por uma condição de engaste nos nós correspondentes à linha do prensa-chapas, assinalada na Figura 35.

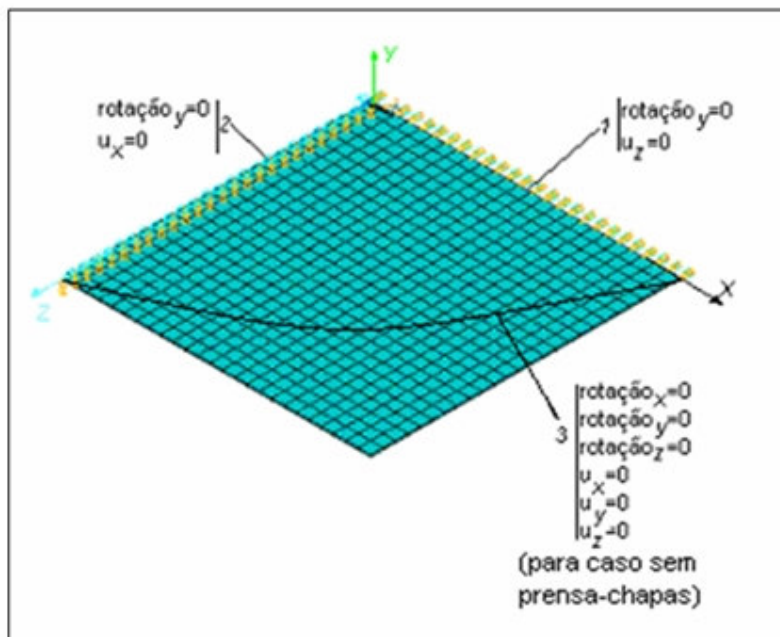


Figura 35 - Restrições aos graus de liberdade para a chapa

3.6.1.2 Condições de contato e atrito

Para a formulação da condição de contato entre o punção e a chapa, e da chapa com a matriz, foram formados componentes com os nós de cada um dos elementos, e imposta a condição de contato automático entre superfície principal e superfície alvo, de forma que os nós com potencial de contato são procurados automaticamente pelo programa.

Para a formulação do contato entre prensa-chapas e chapa, foi utilizada uma condição de contato entre nó e superfície e a opção de contato específica para modelamento de prensa-chapas. Para tanto, é necessário a informação dos nós com potencial de contato para os dois componentes, e a força de dobra aplicada pelo prensa-chapas.

Para o cálculo da força de dobra do prensa chapas, foi tomado como referência o valor de força utilizado no ensaio de Erichsen (19600N), e aplicado o valor de pressão correspondente para a área do prensa chapas do ensaio de Nakazima.

3.6.1.3 Formulação da malha

Dois tipos de elementos foram utilizados para o modelamento do ensaio de Nakazima: os elementos do tipo “Shell”, para modelar a chapa, e elementos do tipo sólido, para modelar o punção e a matriz.

Na Figura 36, é mostrada a formulação da malha do punção, da chapa e do prensa chapas. É possível observar também a disposição da malha de elementos.

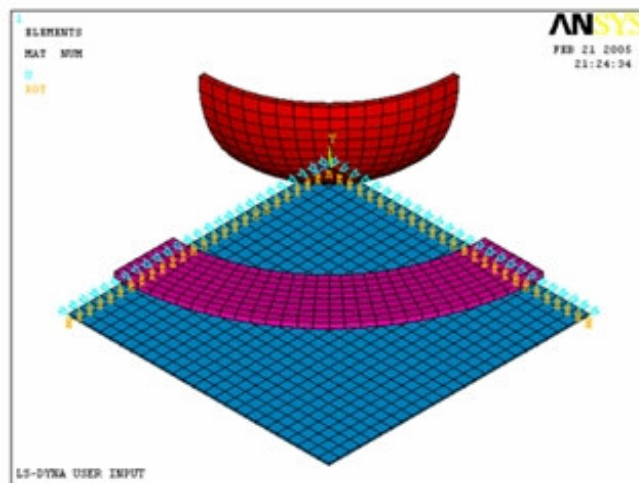


Figura 36 - Configuração da malha

Na Tabela 3, pode ser visto o número de elementos utilizados para modelar o punção, prensa-chapas e matriz.

Tabela 3 - Tipo e quantidade de elementos utilizados

Componente	Tipo de Elemento empregado	Número de elementos
Punção	Sólido	192
Chapa	Thin Shell	625
Prensa Chapas	Sólido	240
Matriz	Sólido	80

Para os elementos do tipo “Shell”, foram utilizadas as seguintes opções:

- Formulação do tipo S/R Hughes-Liu: trata-se de uma formulação similar à de Hughes-Liu, porém com integração reduzida seletiva. Esta formulação exige maior recurso computacional, mas evita certos modos de instabilidade;

- Espessura constante e igual a da chapa utilizada nos ensaios práticos (0,7 mm);
- Número de pontos de integração no sentido da espessura igual a três;
- Regra de integração: quadratura de Gauss;

Para o elemento sólido, nenhuma consideração especial se faz necessária.

3.6.1.4 Especificação da chapa

O material ensaiado DC 06 foi inicialmente caracterizado como anisotrópico. Entre as formas disponíveis no ANSYS / LSDYNA para especificar esse tipo de material, foi selecionado o modelo de Barlat, descrito em Barlat e Lian (1989).

Em Barlat e Lian (1989), é apresentado um modelo matemático para descrever o comportamento plástico de chapas anisotrópicas, submetidas ao estado plano de tensões. Tal modelo permite o uso do Coeficiente de Anisotropia de Lankford nas direções paralela ao sentido de laminação (r_0), a 45° (r_{45}) e a 90° (r_{90}) em relação à direção de laminação.

O critério de escoamento estudado é definido por:

$$a \left| K_1 + K_2 \right|^m + a \left| K_1 - K_2 \right|^m + c \left| 2K_2 \right|^m = 2\sigma_Y^m \quad (13)$$

onde: σ_Y é a tensão de escoamento;

K_1 e K_2 são os invariantes de tensão definidos como:

$$K_1 = \frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2} \quad (14)$$

$$K_2 = \sqrt{K_1 + p^2 \tau_{xy}^2} \quad (15)$$

e as constantes a, c e h são definidas como:

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{r_{90}}{1+r_{90}}} \quad (16)$$

$$c = 2 - a \quad (17)$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (18)$$

O valor de p na Equação (15) pode ser obtido de forma iterativa, enquanto que o valor de m recomendado na Equação (13), é igual a oito para materiais com redes cristalinas cúbica de face centrada (CFC) e seis para materiais com redes cristalinas cúbica de corpo centrado (CCC).

Como a estrutura do material é CCC (informação do fabricante), o coeficiente m escolhido foi seis. As demais propriedades podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades da chapa DC 06 utilizada

Propriedade	Valor	Unidade	Fonte
Densidade (ρ):	7850	kg/cm ³	Literatura
Módulo de elasticidade (E)	210	GPa	Ensaio de Tração
Coeficiente de Poisson (ν)	0,3	(adimensional)	Literatura
Constante de Resistência Plástica (K)	626,8	MPa	Ensaio de Tração
m	6	(adimensional)	Literatura
Coeficiente de anisotropia a 0° (R_0)	2,0483	(adimensional)	Ensaio de Tração
Coeficiente de anisotropia a 45° (R_{45})	1,8659	(adimensional)	Ensaio de Tração
Coeficiente de anisotropia a 90° (R_90)	2,5988	(adimensional)	Ensaio de Tração

3.6.2 Processamento

3.6.2.1 Modelos Computacionais de Materiais avaliados

O ANSYS apresenta duas classes principais de materiais, classificados como “lineares” e “não-lineares”, esta segunda subdividida em três grupos, dos materiais “elásticos”, “inelásticos” e “esponjosos”.

A classe dos materiais elásticos abrange dois sub-grupos principais, dos materiais chamados “hiperelásticos” e “viscoelásticos”, sendo o primeiro grupo ligado a borrachas e o segundo grupo ligado a materiais como o vidro.

O grupo dos materiais inelásticos aparece como principal alvo de estudos em processos de fabricação, dentre os quais se destaca a estampagem por abranger diversos modelos matemáticos de materiais metálicos, podendo citados os seguintes: “*Isotropic Hardening*”, “*Anisotropic Hardening*”, “*Kinematic Hardening*”, “*Barlat*”, “*Rate Dependent Plasticity*”, “*Damage*”, “*Power Law*”, “*Pressure Dependent*” e “*Elastic Viscoplastic Thermal*”. Com a exceção do modelo “*Damage*”, voltado principalmente para concreto e materiais compósitos, a grande maioria dos modelos correlaciona, em seu algoritmo matemático, as principais propriedades mecânicas dos aços, como densidade, tensão de escoamento, coeficiente de Poisson, e até, em alguns casos, o coeficiente de encruamento e o fator de anisotropia, entre outras propriedades.

Cada modelo citado acima possui subitens diferenciados entre si, sendo que, para o trabalho em questão, foram adotados os modelos “*Bilinear Kinematic*”, que corresponde a uma opção dentro do grupo “*Kinematic Hardening*”, o modelo “3d Parameter Barlat”, que aparece como opção do grupo “*Barlat*”, e o modelo “*Transverse Anisotropic*”, que corresponde a um dos modelos do grupo “*Anisotropic Hardening*”. Estes modelos figuram entre os mais utilizados em trabalhos ligados a estampagem.

Durante a etapa de processamento, foram simulados os casos referenciados na Tabela 5, com o objetivo de avaliar diferentes modelos de materiais e a influência das constantes reais e do *shear factor*. A força do punção é calculada pela multiplicação do *shear factor*, que tem valor entre 0,5 e 0,9 (dependendo do material), da espessura e profundidade de estampagem. Constantes reais são chamadas de “*element real constants*” e são características que dependem de cada tipo de elemento, por exemplo, a seção transversal de uma barra. Nem todo tipo de elemento requer *real constants*, por exemplo, 3D SOLID164.

Tabela 5 - Condições de Simulação

Referência de Simulação	shear factor	pontos de integração	Modelo de Material
Simulação 1	0,5	3	3 Parameter Barlat
Simulação 2	1	3	3 Parameter Barlat
Simulação 3	0,866	3	3 Parameter Barlat
Simulação 4	0,866	1	3 Parameter Barlat
Simulação 5	0,866	2	3 Parameter Barlat
Simulação 6	0,866	4	3 Parameter Barlat
Simulação 7	0,866	5	3 Parameter Barlat
Simulação 8	0,866	8	3 Parameter Barlat
Simulação 9	0,866	3	Plastic Kinematic
Simulação 10	0,866	3	Transverse Anisotropic

O computador utilizado nas simulações continha um Processador Turion 1.6 Ghz e 1GB de memória RAM.

3.6.3 Pós-Processamento

O programa utilizado para o pós-processamento será o ANSYS / LSDYNA.

Os resultados de saída do ANSYS a serem analisados ficam salvos em um arquivo com extensão “rst” e podem ser lidos pelo programa, sem a necessidade de leitura do modelo associado aos resultados.

As propriedades de deformação foram comparadas com os resultados de Chemin (2004). Para tanto, um conjunto de nós formando um “caminho” desde o centro do punção até o ombro da matriz, na direção de um dos eixos de simetria, foi selecionado e os valores de ϵ_1 correspondentes aos nós selecionados foram colocados em gráficos, juntamente com os valores experimentais. Serão mostrados gráficos que representam a distribuição de deformação em toda a chapa deformada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS METALOGRÁFICOS

As Figuras 37 e 38, apresentadas a seguir, mostram as microestruturas da seção longitudinal da chapa estudada.

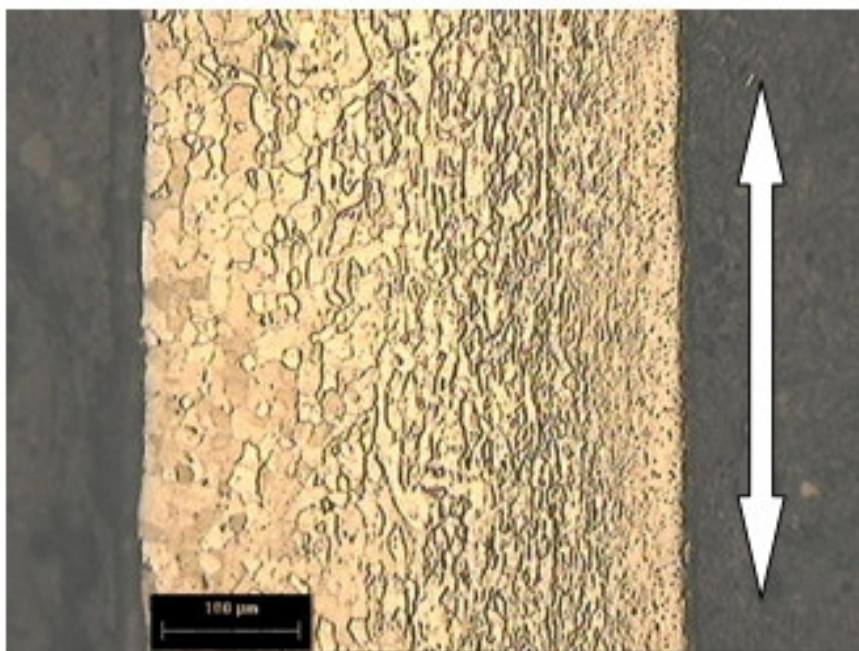


Figura 37 - Metalografia da seção longitudinal da chapa com aumento de 200x

As microestruturas mostradas nas Figuras 37 e 38 mostram claramente um alongamento dos grãos do material na direção da seta vertical colocada ao lado da primeira foto. Isto caracteriza o material estudado como sendo laminado a frio, uma vez que os grãos permaneceram alongados, sem sofrer um processo de recristalização, muito comum no processo de laminação a quente.

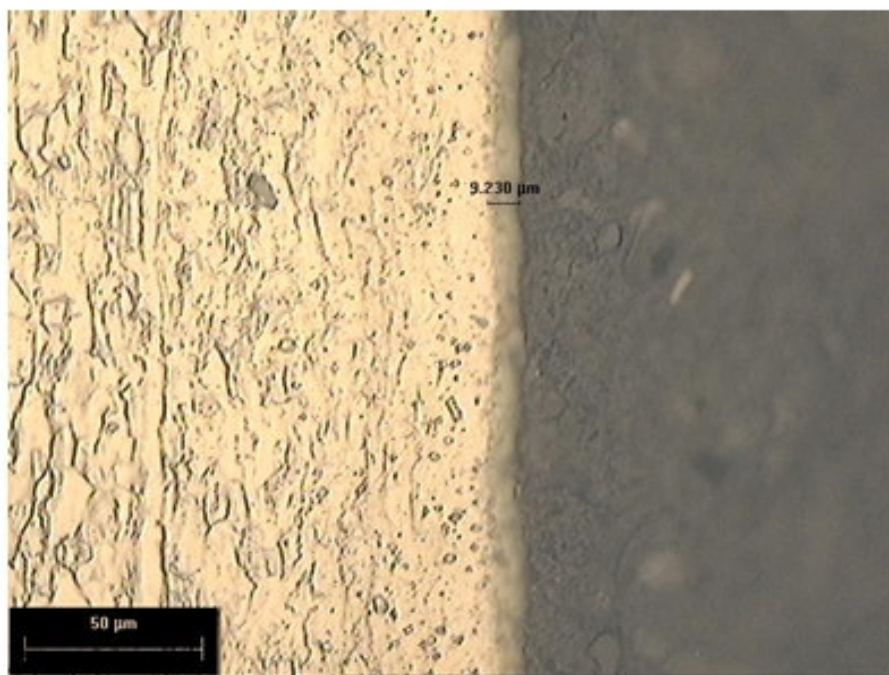


Figura 38 - Metalografia da secção longitudinal da chapa com aumento de 500x

Este alongamento preferencial dos grãos na direção de laminação do material tornou possível, ainda nesta primeira etapa de testes, caracterizar o aço como sendo anisotrópico, uma vez que, devido a esta morfologia dos grãos, o material certamente não apresentará as mesmas propriedades mecânicas, quando submetido a esforços formando diferentes ângulos em relação a sua direção de laminação. A comprovação e quantificação desta característica do material se deram por meio do ensaio de tração.

Os ensaios metalográficos permitiram ainda uma análise prévia relativa ao percentual de carbono do material, o que influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas e características de estampabilidade. Neste caso, nota-se, pelas fotos, que se trata de um aço com baixíssimo percentual de carbono, uma vez que há uma predominância da matriz ferrítica (parte clara) e pouquíssima quantidade de cementita precipitada (Fe_3C).

Os testes metalográficos comprovam as condições de laminação a frio e baixo teor de carbono previstos pela norma DIN 10152, que descreve as características de fabricação do aço DC 06 ZE, alvo de estudo nesta dissertação. Nota-se ainda, na Figura 38, a medida de 9,230 μm para a espessura do revestimento de zinco da chapa metálica, característica que comprova o processo de zincagem como sendo eletrolítico, também previsto pela norma DIN 10152.

4.2 ANÁLISE QUÍMICA

A partir da análise química do material, foi possível a verificação da real composição química da amostra fornecida para os ensaios, bem como sua comparação com o a especificação da norma técnica DIN 10152.

A Tabela 6 mostra a composição química mássica percentual prevista para o material segundo a norma, sendo que os valores mostrados correspondem aos percentuais máximos permitidos para o aço DC 06, ao passo que a Tabela 7 apresenta o resultado do ensaio de análise química realizado em uma amostra do material utilizado neste trabalho.

Tabela 6 - Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152.

Material	Composição Química (partes da massa em %, máx.)				
	C	P	S	Mn	Ti
DC 06+ZE	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

Tabela 7 - Composição química em % resultante da análise química do material.

Material	Composição química (partes da massa em %)														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Nb	B	Pb
DC 06	0,01	0,01	0,12	0,015	0,008	0,011	0,009	0,001	0,035	0,008	0,062	0,001	0,003	0,0002	0,0008

Pela comparação entre os valores máximos permitidos pela norma para o carbono (C), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn) e titânio (Ti), os resultados obtidos do ensaio de análise química mostram que o material utilizado para os testes encontra-se perfeitamente dentro dos limites estabelecidos para sua fabricação segundo norma, ou seja, todos os valores se encontram abaixo do percentual máximo permitido.

Uma característica importante do aço, mostrada tanto na composição química prevista pela norma quanto no resultado da análise química, é o baixo percentual de carbono e a existência do titânio como elemento de liga do material. Este fato caracteriza o DC 06 como um aço típico para operações que exigem alta estampabilidade, uma vez que o baixíssimo percentual de carbono, na faixa de 0,01%, praticamente define o material como sendo um aço de elevada estampabilidade, sendo a redução da resistência mecânica do material, ocasionada pela pequena quantidade de carbono, compensada pelo acréscimo do titânio como elemento de liga. Desta forma, o aço adquire propriedades finais que lhe conferem um elevado índice de conformabilidade, sem que ocorra uma perda acentuada em termos de resistência mecânica, o que não seria viável para o produto final a ser estampado.

4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração, realizados com os corpos de prova retirados formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa, forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material, como o limite de resistência (LR), tensão de escoamento (LE) e alongamento (A). Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus valores limite em termos de resistência, ou seja, a máxima tensão atingida ao longo de todo o ensaio (LR), a tensão máxima atingida ao final da deformação elástica e conseqüente início de deformação plástica (LE) e finalmente o alongamento máximo (A) do material até o instante da fratura.

Outros dados colhidos ao final dos ensaios de tração foram o fator de anisotropia (“r” de Lankford) e coeficiente de encruamento (expoente “n”) do material. Estes dois parâmetros caracterizam o material quanto a sua estampabilidade, sendo o coeficiente de encruamento (n) diretamente associado ao modo de conformação por estiramento e o fator de anisotropia (r) ligado ao modo de conformação por embutimento profundo.

Além das propriedades mecânicas e dos parâmetros de estampabilidade do material, o ensaio de tração permitiu ainda uma avaliação do material quanto ao perfil da curva tensão vs. deformação da chapa metálica.

A Tabela 8 mostra os resultados referentes às propriedades mecânicas do material obtidas nos ensaios, em comparação aos valores determinados pela norma do aço DC 06.

Tabela 8 - Comparativo das propriedades LR, LE e A.

Material : DC 06		
Média dos ensaios de tração	LR (MPa)	300,5
	LE (MPa)	169,9
	A (%)	49,6
Norma DIN 10152	LR (MPa)	270 - 350
	LE (MPa)	máx. 190
	A (%)	min. 37

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostraram que os valores de LR, LE e A, obtidos pelos ensaios de tração, se enquadram perfeitamente dentro dos valores pré-estabelecidos pela norma, sem exceder ou mesmo se aproximar da margem limite determinada. Isto garante que, em termos de propriedades mecânicas, a amostra de aço a ser

utilizada nos testes subseqüentes está perfeitamente liberada, sem nenhuma restrição que possa influenciar nos resultados dos próximos ensaios laboratoriais.

Os parâmetros de estampabilidade r e n da chapa, obtidos pelos ensaios de tração, estão apresentados na Tabela 9. Os valores foram obtidos a partir da realização de um mínimo de três ensaios para cada direção de corpo de prova, através dos quais foi calculada uma média para cada direção, conforme prevê a norma NBR 8164. A Tabela 9 apresenta, além dos valores médios de r e n para as direções de 0° , 45° e 90° , o valor da anisotropia normal (\bar{r}) e da anisotropia planar (Δr).

Tabela 9 - Parâmetros de estampagem R e n.

Material: DC 06	
Parâmetros	Média dos Ensaios
r_0	2,0483
r_{45}	1,8659
r_{90}	2,5988
\bar{r}	2,0948
Δr	0,4576
n_0	0,2392
n_{45}	0,2352
n_{90}	0,2323

Os ensaios de tração realizados permitiram não apenas uma confirmação das características de estampabilidade e resistência mecânica, previstos anteriormente para o material através dos ensaios metalográfico e de análise química, mas também uma análise direta das reais condições de estampagem do aço.

Os resultados da Tabela 9 mostraram que o aço DC 06 é realmente um material destinado a operações que exigem um alto grau de estampagem, uma vez que tanto o fator r quanto o coeficiente n apresentaram valores suficientemente elevados, próximos ou acima de 2,0 para o r e acima de 0,2 para o n , a ponto de garantir esta característica do material. Um fato importante de ser observado é a grande variação dos resultados do fator r para cada uma das três direções (0° , 45° e 90°) ensaiadas, representadas por r_0 , r_{45} e r_{90} , respectivamente. Neste caso, o maior valor de r foi atingido para a direção de 90° , em torno de 2,6, o que implica dizer que o material apresenta melhor estampabilidade nesta direção. Ou seja,

apresenta uma tendência de se deformar mais eficientemente aos esforços perpendiculares à direção de laminação da chapa, atingindo um nível de conformação maior e sem ruptura nesta direção. Para as direções de 0° e 45° , os valores de r se apresentaram na faixa de 2,0 e 1,9 respectivamente. Estes valores permitem dizer que o material apresenta boas características de conformabilidade também para estas direções, porém inferiores à direção de 90° .

Esta tendência do material apresentar propriedades diferentes para cada uma das três direções ensaiadas já fora antecipada pelos ensaios metalográficos, que mostraram o alongamento dos grãos na direção de laminação do material. Devido a esta característica, já se esperava resultados diferentes para r_0 , r_{45} e r_{90} nos ensaios de tração, visto que este alongamento preferencial dos grãos em uma direção acarretaria numa característica anisotrópica da chapa, influenciando, desta forma, os resultados dos ensaios de tração.

Assim, pode-se classificar o material ensaiado como sendo um aço anisotrópico, uma vez que apresentou valores diferentes para r_0 , r_{45} e r_{90} ($r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$). Este fato indica que o material apresenta diferentes propriedades mecânicas no plano da chapa, ou seja, a reação do material é diferente conforme a direção de aplicação dos esforços no plano do material. Os diferentes valores para cada uma das direções consideradas nos ensaios implicam em dizer que o material apresenta uma tendência a sofrer um fenômeno conhecido como orelhamento, que é uma ondulação ocasionada na superfície livre da chapa, região esta que não sofre a ação do prensa-chapa, durante o processo de estampagem do material. A tendência de o material sofrer o orelhamento é quantificada pelo Δr , apresentado na Tabela 9 com valor de 0,4576 para o DC 06. Quanto maior o valor do Δr , maior a tendência do material sofrer orelhamento, ao passo que, se este valor fosse nulo ($\Delta r = 0$), este fenômeno não aconteceria com o material. O valor obtido para o DC 06, indica que este aço certamente apresentará um certo nível de orelhamento.

Além da anisotropia planar, o DC 06 apresentou ainda anisotropia normal, indicada na Tabela 9 pelo parâmetro \bar{r} . O fato da chapa, de forma geral, se deformar muito mais no plano do que na espessura ($\bar{r} > 1$) atribuem ao DC 06 uma excelente estampabilidade. Essas deformações seriam iguais se o valor do fator \bar{r} fosse igual a 1, o que classificaria a chapa como sendo isotrópica normal.

O coeficiente de encruamento resultante dos ensaios foi de aproximadamente 0,23 para cada uma das três direções em que o material foi ensaiado, representados por n_0 , n_{45} e n_{90} para os ângulos de 0° , 45° e 90° , respectivamente. A partir deste valor, pode-se dizer que o DC 06 realmente apresenta uma boa estampabilidade. Assim como o valor do fator r , quanto

maior o valor do coeficiente de encruamento n , melhor será a estampabilidade do material. Porém, o fator r determina a estampabilidade para o modo de deformação por embutimento profundo e o expoente n para o modo de deformação por estiramento.

O resultado obtido para o expoente n nos ensaios mostra que o material em estudo tende a apresentar o que se chama de um elevado limite de instabilidade plástica, o que lhe confere boa estampabilidade por estiramento. Quanto maior o limite de instabilidade do material, o material, quando submetido a estampagem, tende a distribuir a deformação para as regiões vizinhas ao local mais deformado, resultando num afinamento (redução de espessura) mais homogêneo da chapa. Isso evita que ocorra uma redução da espessura localizada numa porção do material, onde fatalmente ocorreria a ruptura da chapa.

A Figura 39 mostra a curva tensão vs. deformação para cada um dos 9 corpos de prova ensaiados (três para cada ângulo em relação à direção de laminação do material). As curvas, deslocadas ao longo da deformação, para melhor visualização, mostram a deformação do material até um percentual de 18%, quando os ensaios foram interrompidos para medição dos corpos de prova.

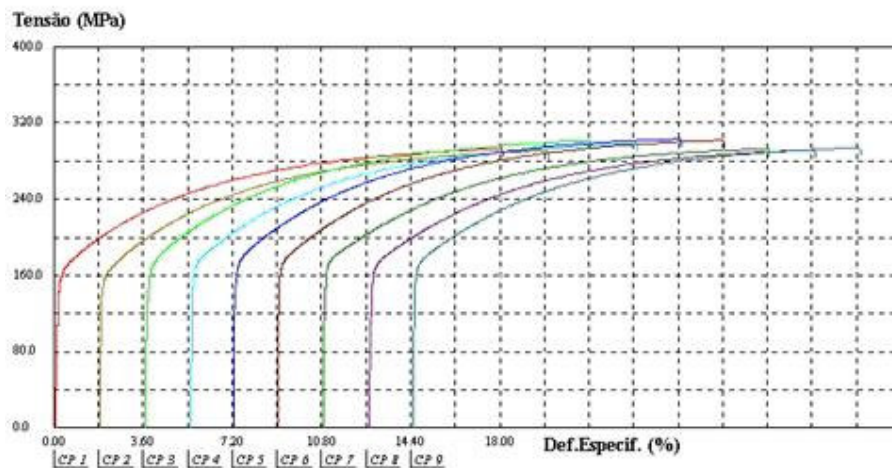


Figura 39 - Gráfico Tensão vs. Deformação

As curvas se mostraram idênticas em todos os ensaios, o que comprova a boa repetibilidade dos ensaios. Outro detalhe importante observado nas curvas foi a inexistência do ponto de escoamento definido no final da região elástica. Este é um dado importante para operações de estampagem, uma vez que neste processo de fabricação, este ponto poderia acarretar defeitos no produto final, como as linhas de Lüders, quando as deformações em alguns pontos da peça atingem uma deformação plástica, próxima da região elástica, ocasionando esta falha.

4.4 ENSAIOS DE MARCINIAK

A fratura durante o ensaio de Marciniak ocorreu na região do raio do punção, como era esperado. Na Figura 40, é apresentado tal fenômeno.



Figura 40 - Corpo de prova 200x200 do ensaio de Marciniak

Para realização do ensaio de Marciniak, inicialmente foi utilizado *dummy blank* com espessura de 0,5 mm e furo de \varnothing 68 mm. Na Figura 41, pode ser observado a dispersão dos pontos no diagrama limite de conformação.

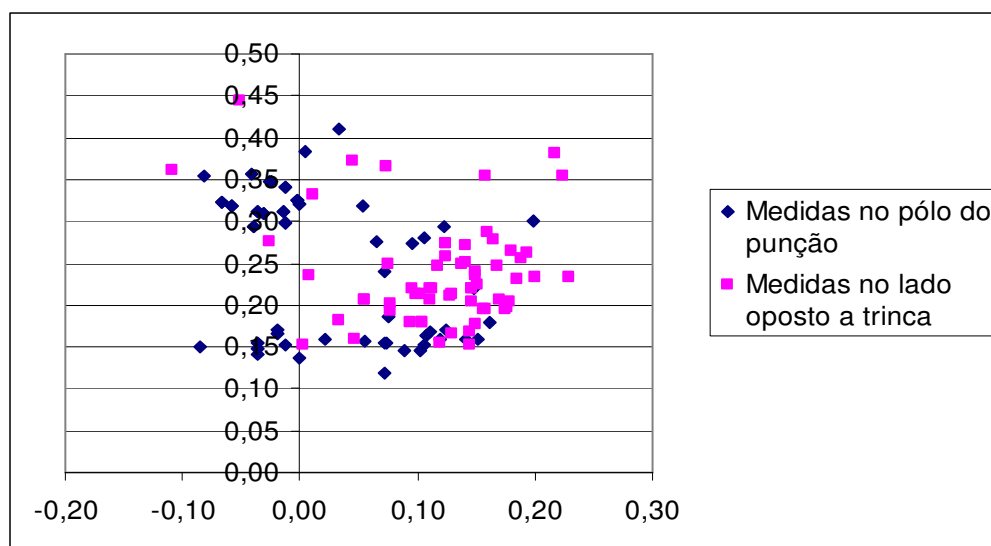


Figura 41 - DLC com *dummy blank* com furo de \varnothing 68 mm e 0,5 mm de espessura

Foram medidas as elipses no pólo do punção e no lado oposto à trinca. A dispersão dos valores medidos se deveu, principalmente, a alguns *dummy blanks* que se romperam durante a realização do ensaio. Com isso, a CLC não ficou bem caracterizada.

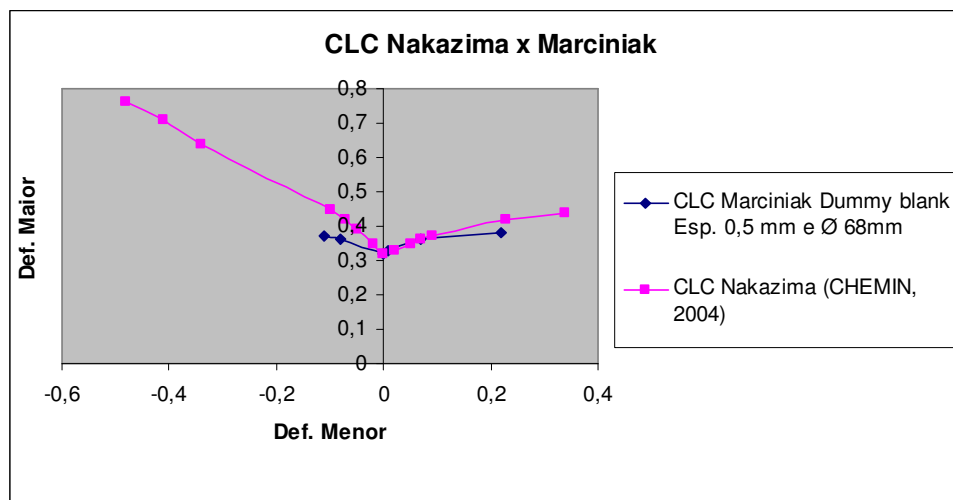


Figura 42 - CLC Nakazima (CHEMIN, 2004) comparada com CLC Marciniak

Observa-se, na Figura 42, a CLC Marciniak comparada com a CLC Nakazima de (CHEMIN, 2004). No primeiro caso, a chapa não apresentou deformações de estiramento e embutimento suficientes para levantamento completo da CLC. Esta foi levantada a partir dos pontos de máxima deformação maior.

Foram adotados, para continuação dos experimentos, *dummy blanks* com espessuras maiores, 2 mm e 3 mm, e com furo de diâmetro de 68 mm. Na Figura 43, é mostrado o diagrama limite de conformação com os pontos medidos nas elipses dos corpos de prova associados a *dummy blanks* mais espessos.

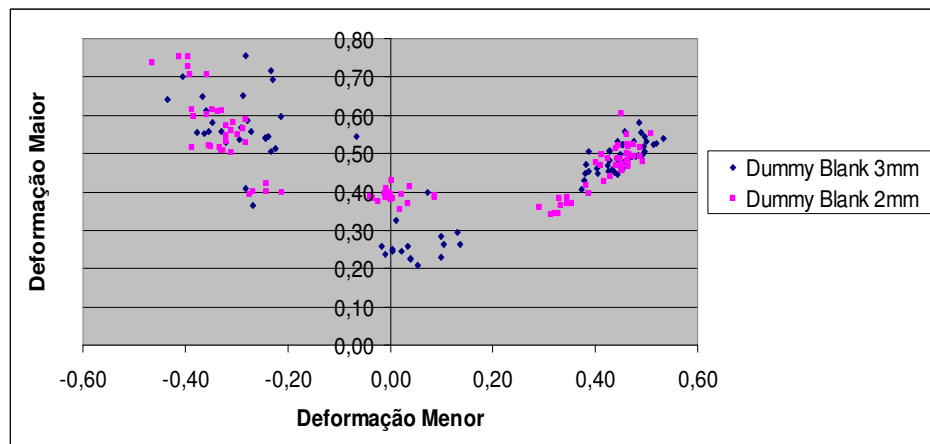


Figura 43 - DLC *dummy blank* com 2 mm e 3 mm de espessura

Os *dummy blanks* com 2 mm e 3 mm suportaram os esforços do ensaio e não se romperam. Na figura 43, pode ser observado, tanto do lado do embutimento quanto do lado do estiramento, a nuvem de pontos dos ensaios.

As curvas CLC com *dummy blank* de 2 mm e 3 mm foram traçadas e comparadas com a curva de Nakazima (CHEMIN, 2004) como mostrado na Figura 44.

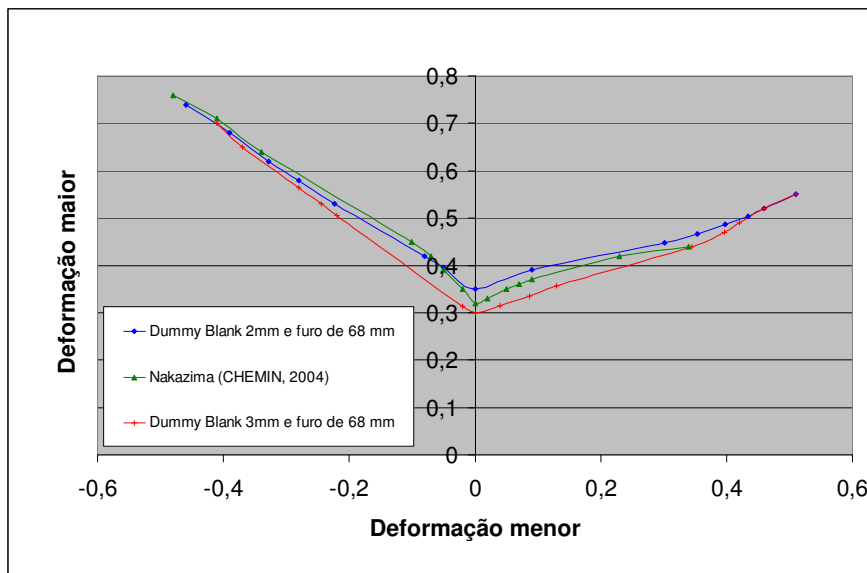


Figura 44 - CLCs com *dummy blanks* de 2 mm e 3 mm

Na Figura 44, é mostrado que as curvas aproximaram-se bem da CLC feita pelo método de Nakazima. A explicação para a diferença nos níveis de deformações atingidas para o embutimento profundo e para o estiramento se encontra na variação da largura dos corpos de prova. A condição de deformação de embutimento é obtida pela liberação para a deformação usando uma chapa de menor largura e assim se permite obter os estados de tensão e deformação que se tem em um embutimento. À medida que se reduzia a largura dos corpos de prova, se diminuía conseqüentemente a ação do prensa-chapas, que prende o material circunferencialmente em torno do punção, a fim de impedir o escorregamento da chapa. Desta forma, uma porção lateral dos corpos de prova mais estreitos que o diâmetro do prensa-chapas oferecia certa liberdade para o material se deformar, tendendo a promover um esforço uniaxial de tração, gerando assim um maior alongamento do corpo de prova no sentido do comprimento e uma redução na largura. Como os círculos se transformam em elipses no caso típico do embutimento profundo, foram geradas, no presente caso, elipses mais alongadas (maior deformação ϵ_1) e estreitas (deformação negativa ϵ_2). Assim sendo, quanto menor a largura dos corpos de prova utilizados, menores eram as deformações ϵ_2 obtidas, fato este que permitiu a obtenção de todo o perfil da CLC para o embutimento profundo. No ensaio de

Marciniak, foram utilizadas larguras diferentes nos corpos de prova, em relação aos utilizados no ensaio de Nakazima.

Foi avaliado *dummy blank* com furo de 50 mm de diâmetro e espessura de 2 mm, objetivando avaliar a influência do diâmetro do furo. Na Figura 45, é apresentado o diagrama limite de conformação.

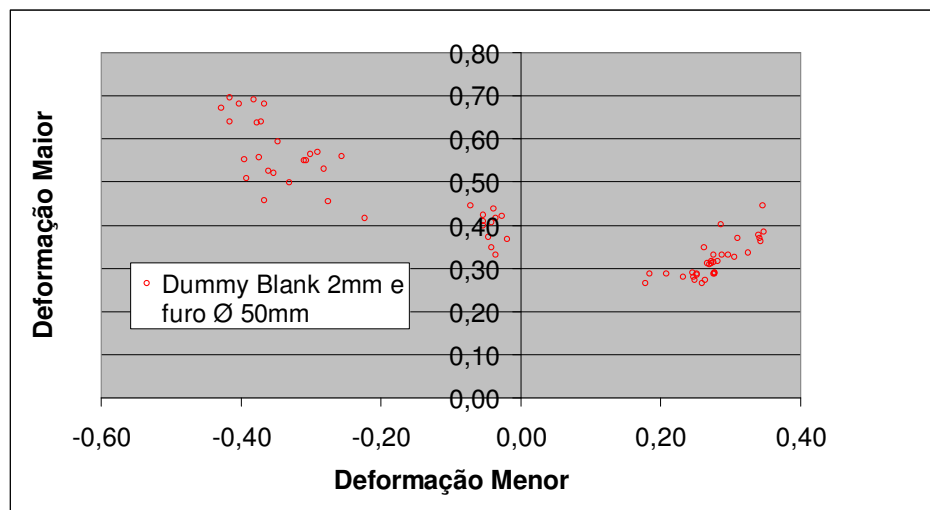


Figura 45 - DLC com *dummy blanks* de 2 mm de espessura e furo de Ø 50 mm

A curva limite de conformação do *dummy blank* com furo de 50 mm de diâmetro e espessura de 2 mm também foi levantada (Figura 46), mas não se verificaram mudanças marcantes com relação as CLCs com *dummy blanks* com furo de diâmetro 68 mm, embora, visualmente, a CLC que mais se aproximou da CLC com ensaio do ensaio de Nakazima foi esta última.

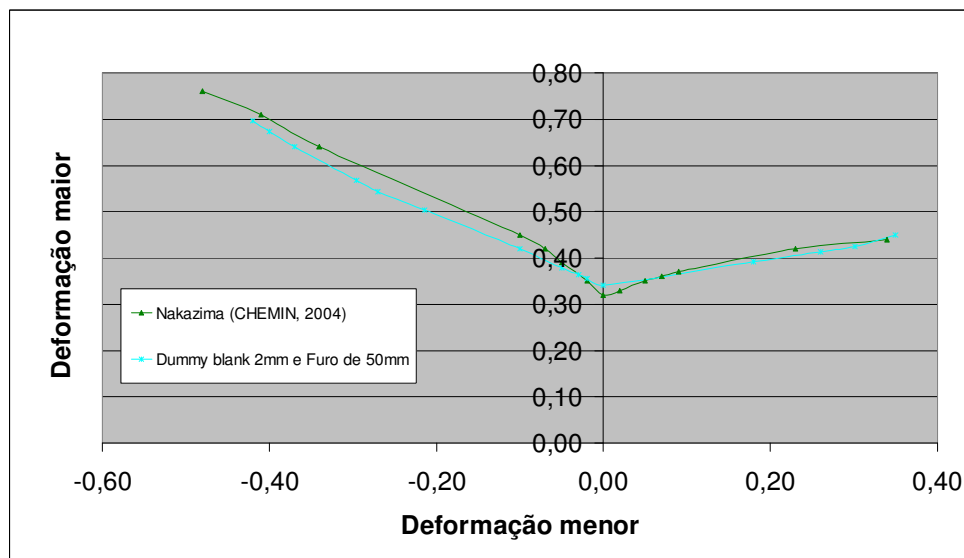


Figura 46 - CLC com *dummy blanks* de 2 mm de espessura e furo de Ø 50 mm

Todas as situações propostas foram testadas e avaliadas; para cada caso foi gerada a CLC. Analisando visualmente todas as curvas na Figura 47, é possível notar que o ensaio de Marciniak com *dummy blank* de 2 mm de espessura e furo de 50 mm de diâmetro foi o que mais se aproximou da curva obtida através do ensaio de Nakazima. A CLC com furo de Ø 68 mm também ficaram bem próximas. Com diâmetro entre 50 mm e 68 mm houve pouca variação.

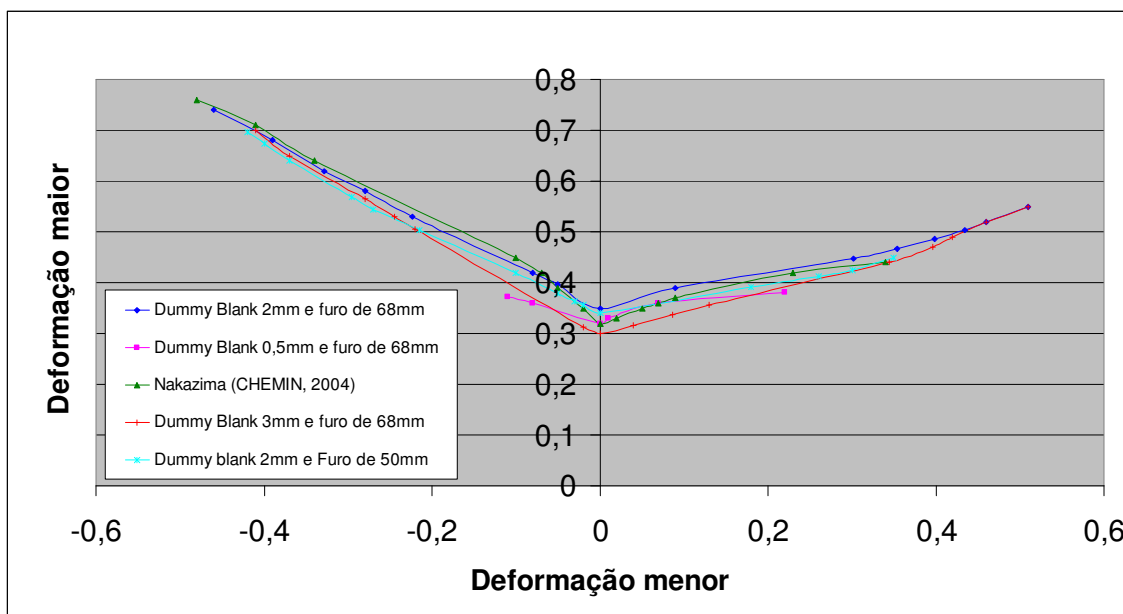


Figura 47 - Curvas Limite de Conformação de todos os casos estudados

4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações foram feitas visando avaliar as respostas do software com os vários modelos de material e efeito da variação do *shear factor* e pontos de integração. Foram observados os pontos de máxima deformação, para os eixos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , além da distribuição de tensões no material, segundo o critério de Von Mises.

As Figuras 48, 49 e 50 mostram as deformações resultantes na chapa, segundo o modelo “3 Parameter Barlat”.

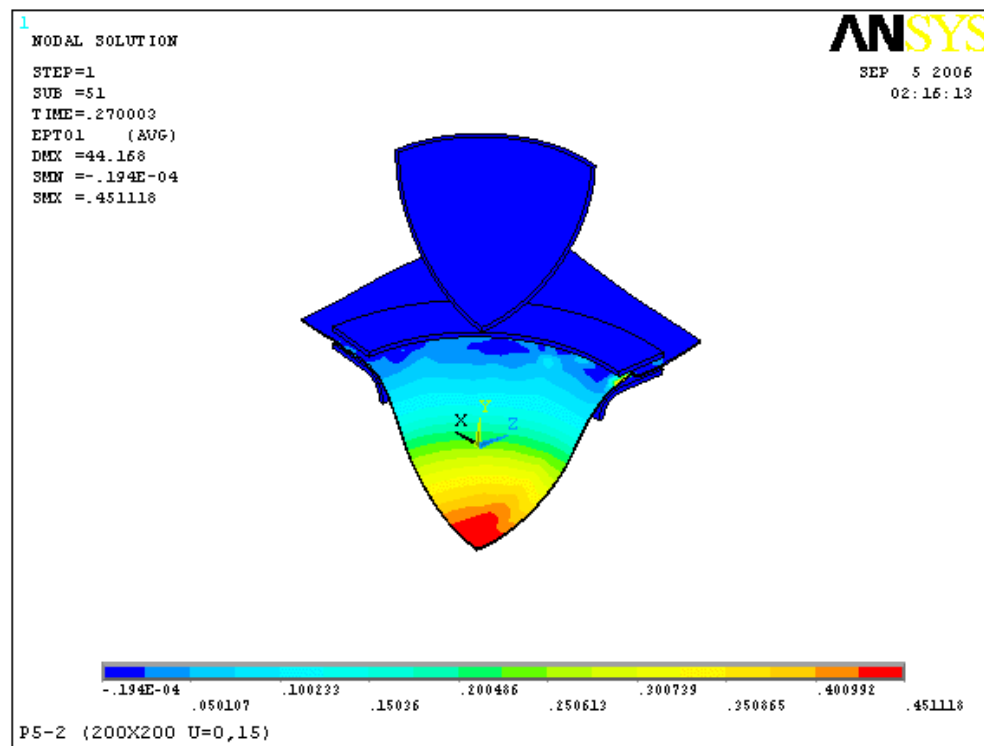


Figura 48 - Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo 3 Parameter Barlat

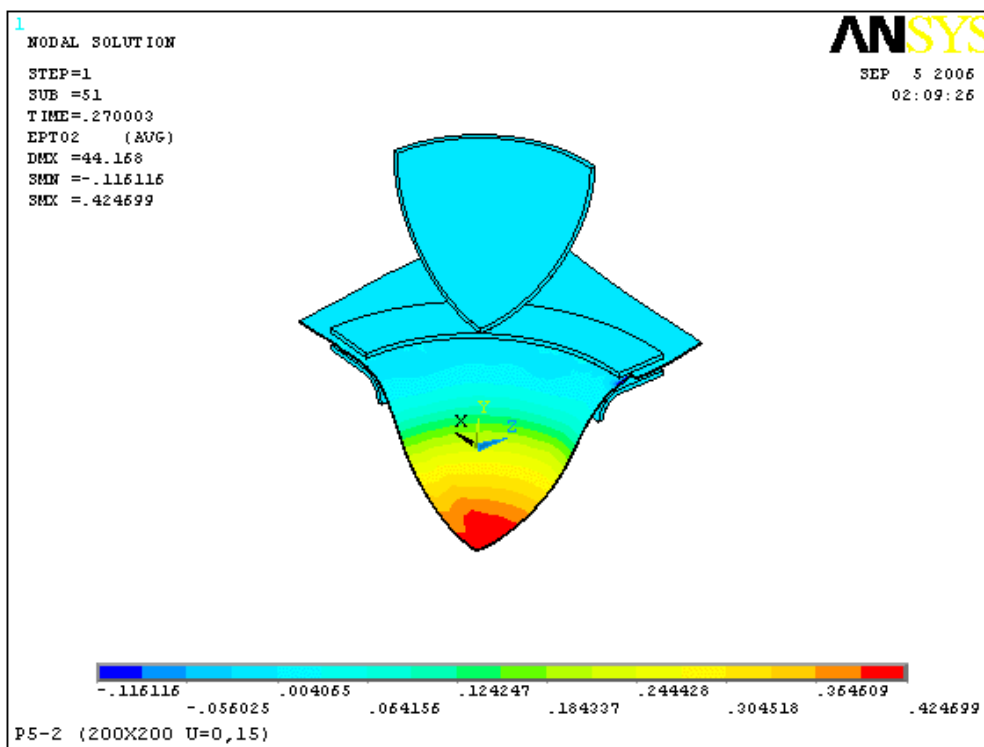


Figura 49 - Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo 3 Parameter Barlat

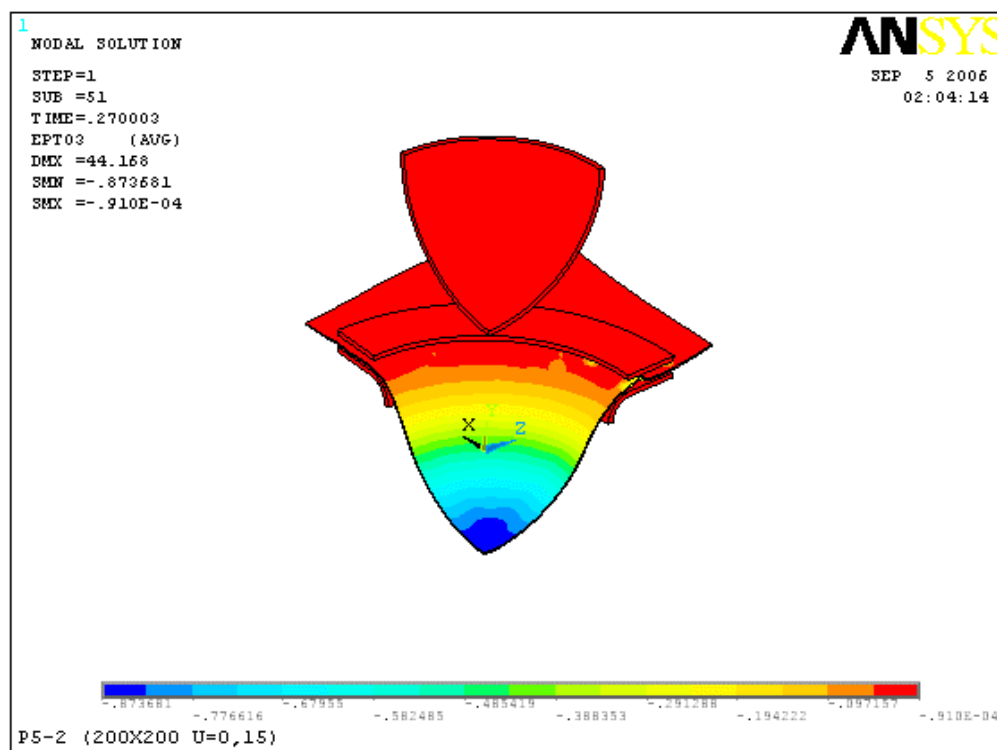


Figura 50 - Deformação no eixo ϵ_3 , segundo o modelo 3 Parameter Barlat

De acordo com as Figuras 48 e 49, nota-se que o ponto de maior deformação do material concentrou-se principalmente no topo do punção, atingindo valores de aproximadamente 0,40 para o eixo maior ϵ_1 e 0,36 para o eixo menor ϵ_2 . Como consequência, a maior redução de espessura ocorreu na mesma região, como mostra a Figura 50, com uma deformação de -0,87 para o eixo ϵ_3 . De acordo com os ensaios experimentais da literatura realizados com no aço DC 06, esta condição de máxima deformação no topo do corpo de prova foi obtida quando se utilizou um filme de poliuretano como agente lubrificante entre o punção e a chapa, uma vez que os ensaios sem lubrificação tiveram pontos de máxima deformação concentrados na altura do raio do punção.

A Figura 51 mostra a distribuição de tensão na chapa, também para o modelo “3 Parameter Barlat”, segundo Von Mises.

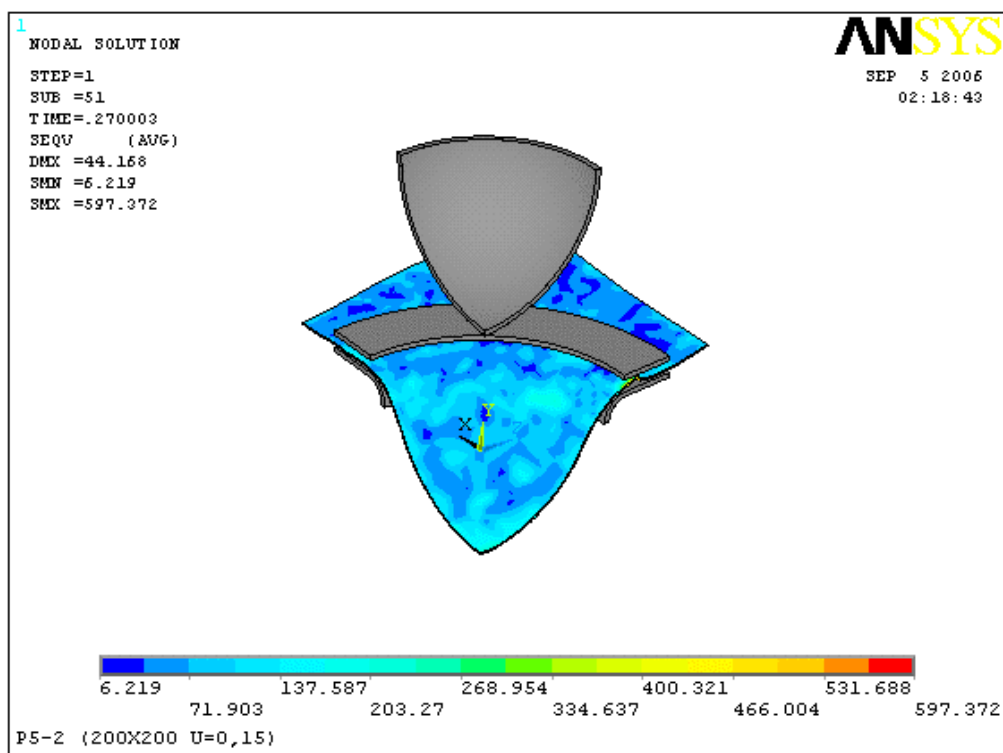


Figura 51 - Distribuição de tensões no material, segundo o modelo 3 Parameter Barlat

De acordo com a Figura 51, nota-se que não foram gerados pontos com grandes níveis de tensão no material, atingindo valores máximos na faixa de 203 MPa. A distribuição de tensões na chapa apresentou-se relativamente uniforme para o modelo “3 Parameter Barlat”, não havendo um ponto ou uma região onde se pudesse notar, com clareza, a condição de máxima concentração de tensões.

As Figuras 52, 53 e 54 mostram, respectivamente, as deformações para os eixos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 resultantes da simulação realizada a partir o modelo de material “Plastic Kinematic”.

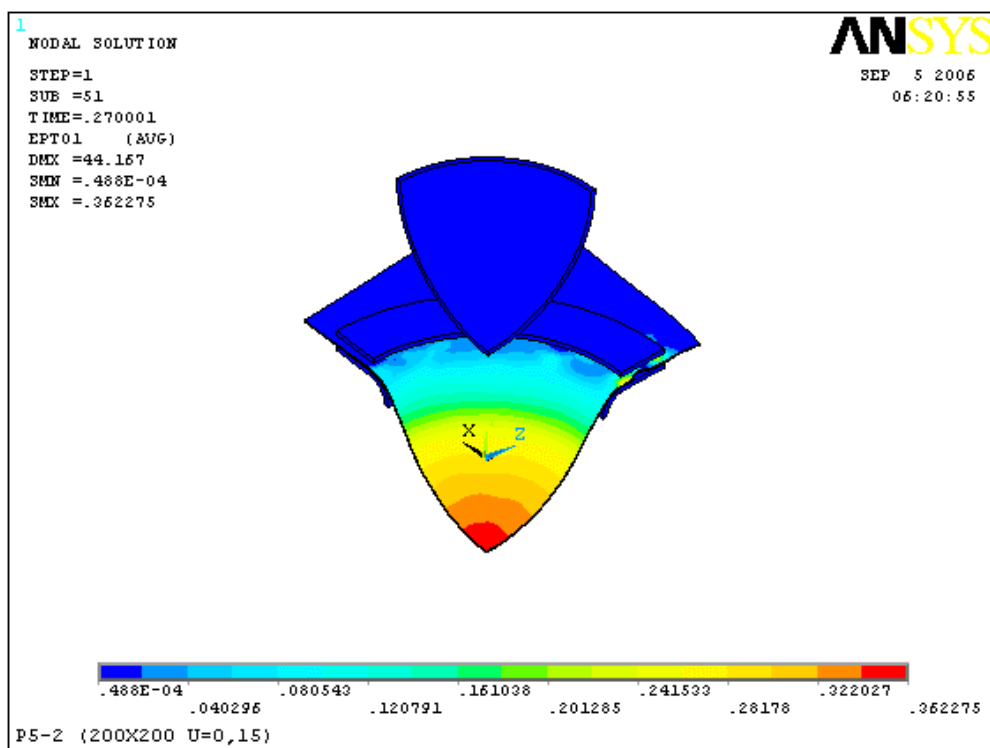


Figura 52 - Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo Plastic Kinematic

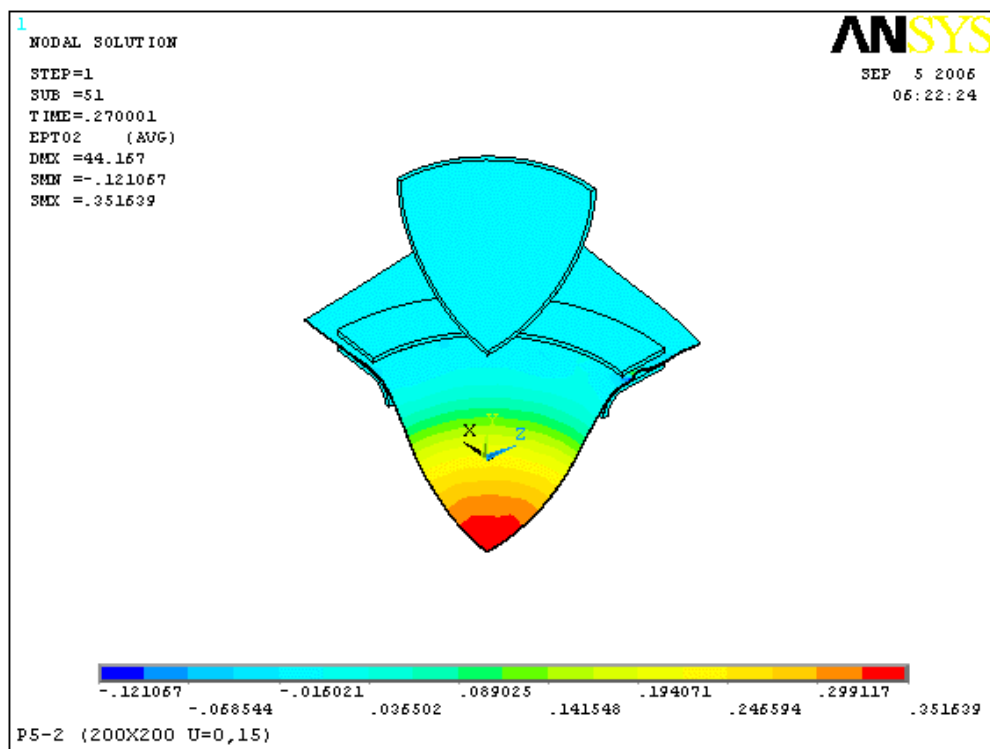


Figura 53 - Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo Plastic Kinematic

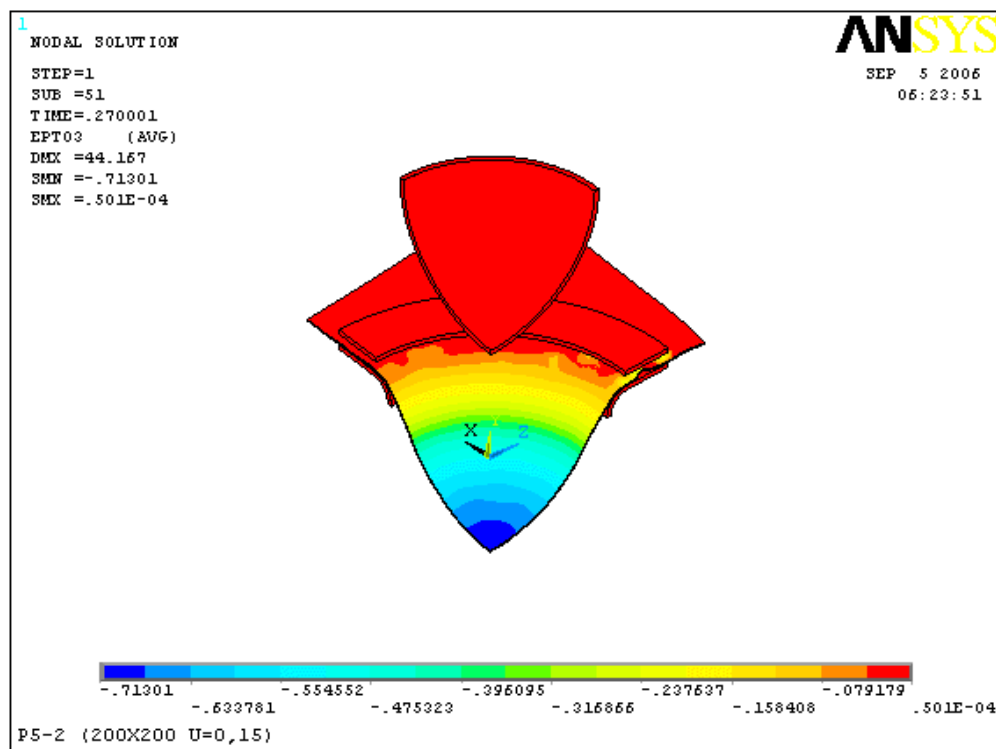


Figura 54 - Deformação no eixo ϵ_3 , segundo o modelo Plastic Kinematic

Pela distribuição das deformações obtidas na chapa para o modelo “Plastic Kinematic”, nota-se grande semelhança com os resultados obtidos com o modelo “3 Parameter Barlat”, se comparadas as regiões onde se concentraram as maiores deformações, para os três eixos de deformações, ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 . A variação de resultados aconteceu, no entanto, para os valores de máximos de deformações atingidos para os eixos, sendo de aproximadamente 0,32 , 0,30 e -0,71, respectivamente.

A distribuição de tensões na chapa, segundo o modelo “Plastic Kinematic”, também apresentou certa semelhança aos resultados gráficos obtidos com o modelo “3 Parameter Barlat”, a não ser pelo fato de evidenciar melhor as regiões de maior concentração de tensões próximas ao raio do punção e no topo do mesmo, onde foram obtidos valores na faixa de 266 MPa, superiores aos valores obtidos com o modelo “3 Parameter Barlat”, como mostra a Figura 55.

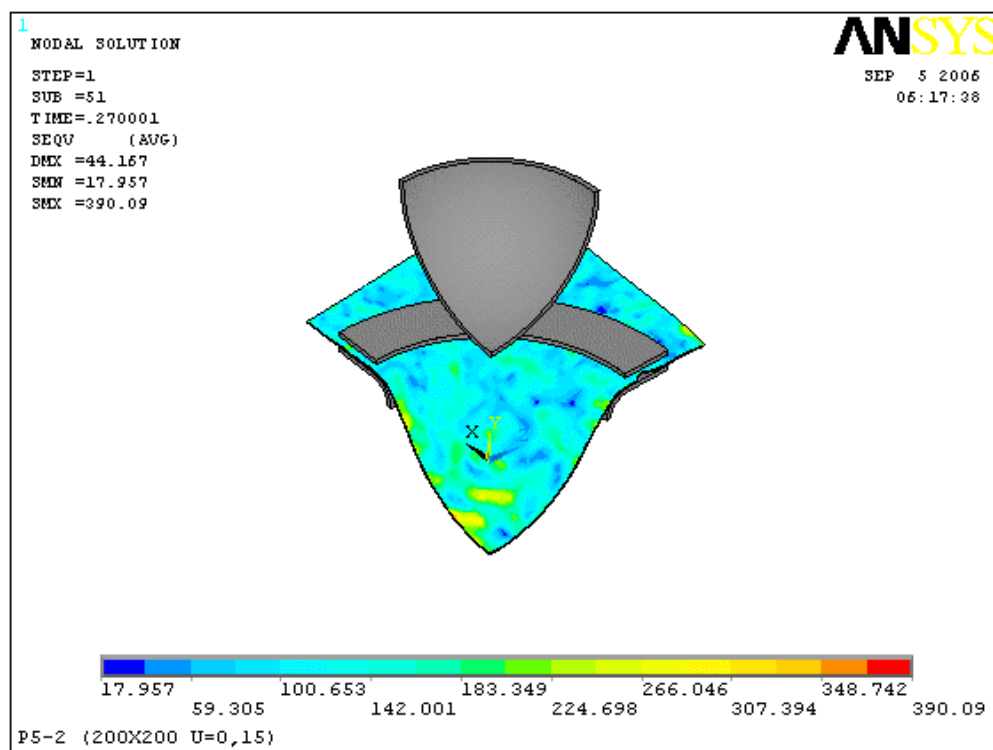


Figura 55 - Distribuição de tensões no material, segundo o modelo Plastic Kinematic

Além dos modelos “3 Parameter Barlat” e “Plastic Kinematic”, foram realizadas simulações com o modelo “ Transverse Anisotropic”, sendo os resultados apresentados nas Figuras 56, 57, 58 e 59 referentes às deformações nos eixos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , além da distribuição de tensões no material, respectivamente.

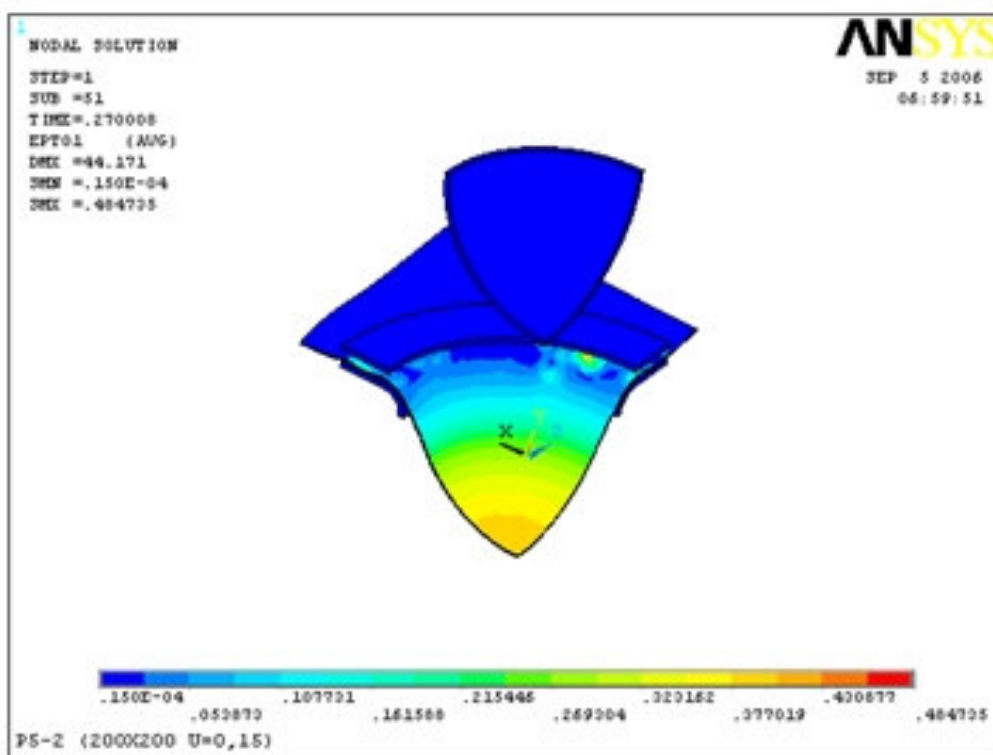


Figura 56 - Deformação no eixo de maior deformação ε_1 , segundo o modelo Transverse Anisotropic

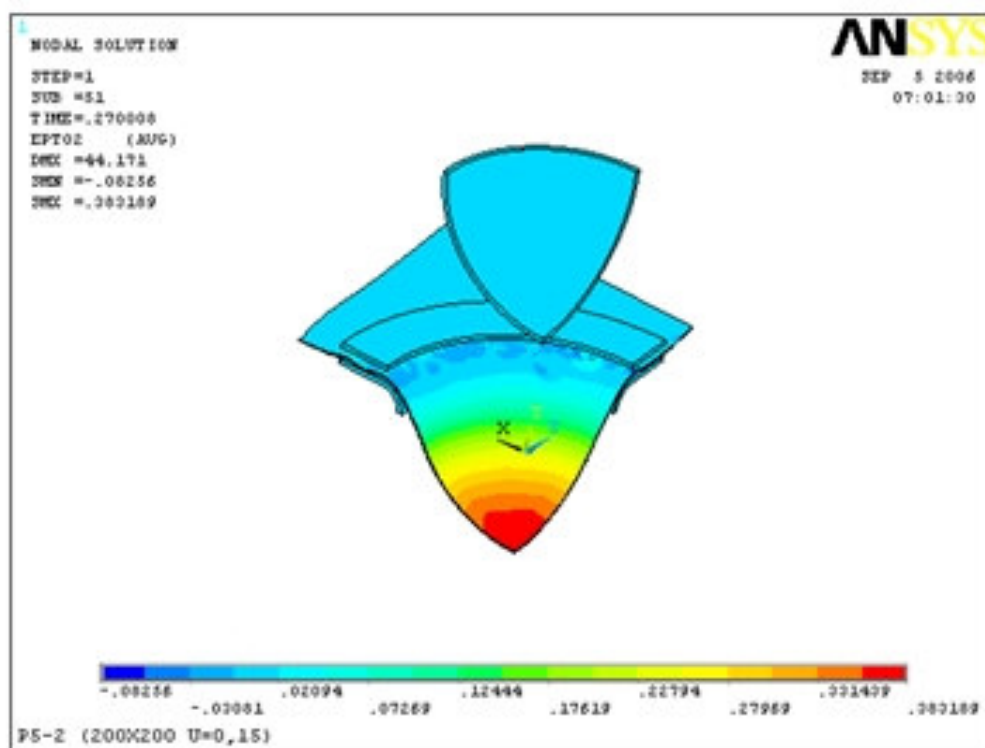


Figura 57 - Deformação no eixo de menor deformação ε_2 , segundo o modelo Transverse Anisotropic

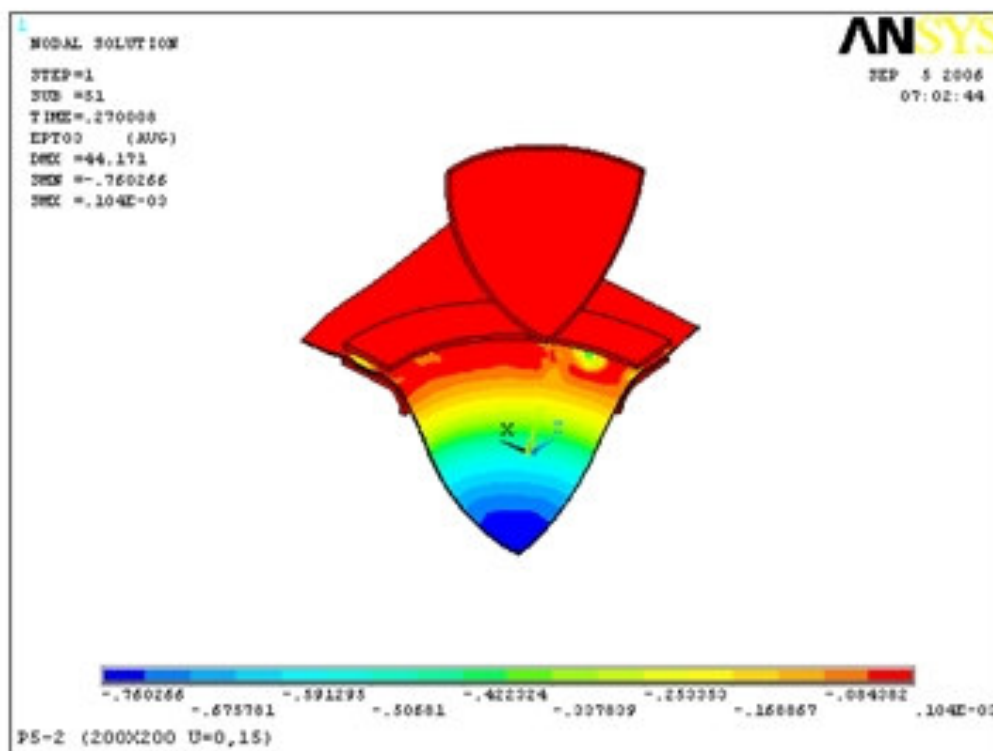


Figura 58 - Deformação no eixo ϵ_3 , segundo o modelo Transverse Anisotropic

Nota-se, pelos gráficos apresentados nas Figuras 56, 57 e 58, que o modelo “*Transverse Anisotropic*” apresentou as mesmas características dos modelos anteriores quanto ao local de máxima deformação dos eixos ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , ou seja, se concentrando preferencialmente no topo do punção. Pode-se dizer então que, de acordo com os resultados, há uma concordância entre os modelos, no que diz respeito à forma como as deformações se distribuem no material, concentrando-se sempre na mesma região.

A diferença principal entre os modelos de materiais utilizados nas simulações ocorreu nos valores de deformações atingidas, uma vez que para o modelo “*Transverse Anisotropic*” obteve-se uma deformação máxima de 0,43 para o eixo ϵ_1 , de 0,33 para o eixo ϵ_2 e de -0,76 para o eixo ϵ_3 .

Quanto à distribuição das tensões na chapa, segundo o modelo “*Transverse Anisotropic*”, pode-se dizer que houve uma situação intermediária entre os modelos anteriores. O valor máximo de tensão obtido ficou na faixa de 205 MPa, ou seja, muito próximo dos 203 MPa do modelo “3 Parameter Barlat”, como mostra a Figura 59.

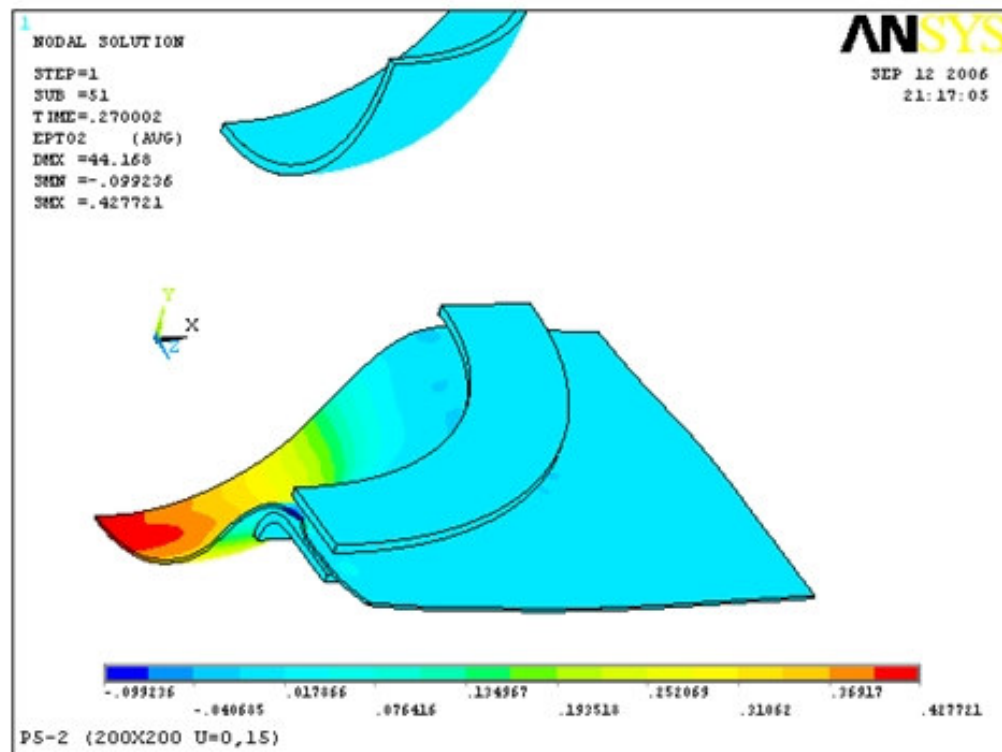


Figura 61 - Deformação ε_2 para *shear factor* 0,5 e 3 pontos de integração

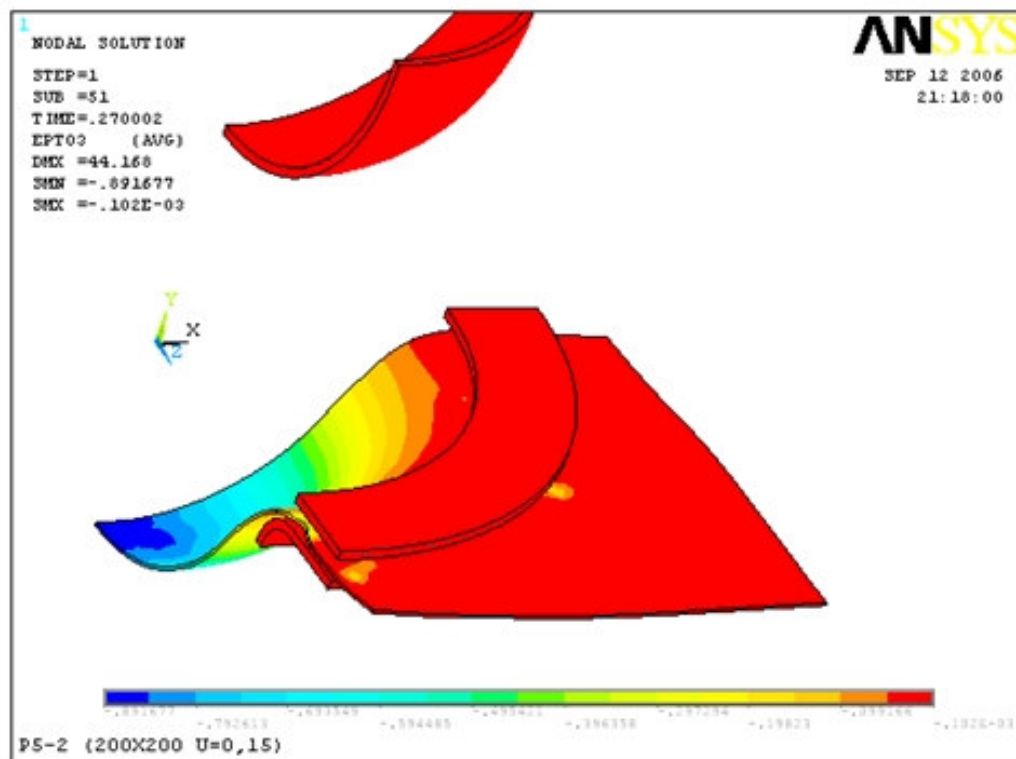


Figura 62 - Deformação ε_3 para *shear factor* 0,5 e 3 pontos de integração

Nas Figuras 60, 61 e 62 constam os resultados de deformação obtidos na simulação com *shear factor* de 0,5 e 3 pontos de integração, utilizando o modelo 3 Parameter Barlat. Podemos observar valores de deformação próximos aos valores obtidos no modelo Transverse Anisotropic.

As deformações levantadas por meio da simulação numérica em cada caso são apresentadas na Tabela 10. Nesta tabela, são comparados os valores obtidos com o método de elementos finitos para cada caso estudado com os dados experimentais do teste de Nakazima experimental realizado por Chemin (2004). É importante verificar se os valores das maiores deformações simuladas estão próximas das deformações verdadeiras do ensaio de Nakazima apresentadas na curva CLC.

Tabela 10 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais

Referência de Simulação	Shear factor	Pontos de integração	Modelo de Material	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
Simulação 1	0,5	3	3 Parameter Barlat	0.463622	0.427721	-0.891677
Simulação 2	1	3	3 Parameter Barlat	0.453741	0,423549	-0,869718
Simulação 3	0,866	3	3 Parameter Barlat	0.463622	0.427721	-0.891677
Simulação 4	0,866	1	3 Parameter Barlat	0,029576	0,020672	-0,023376
Simulação 5	0,866	2	3 Parameter Barlat	0,45094	0,418977	-0,869263
Simulação 6	0,866	4	3 Parameter Barlat	0,461374	0,43146	-0,892079
Simulação 7	0,866	5	3 Parameter Barlat	0,452725	0,426013	-0,87744
Simulação 8	0,866	8	3 Parameter Barlat	0,560656	0,425816	-0,872241
Simulação 9	0,866	3	Plastic Kinematic	0,322027	0,299117	-0,71301
Simulação 10	0,866	3	Transverse Anisotropic	0,430877	0,331439	-0,760266
Nakazima Experimental	-	-	-	0,44	0,34	-0,78

Pelos valores de deformações obtidos, pode-se dizer que o modelo que melhor se aproximou dos resultados experimentais foi o “*Transverse Anisotropic*”. Os resultados gerados pelos outros modelos, porém, não podem ser considerados ruins, uma vez que os valores práticos foram obtidos por meio de ensaios executados até o ponto de fratura do material, ensaios esses que, devido à inércia do punção, podem ter ultrapassado em demasia o seu limite exato de deformação.

Os tempos de processamento de alguns casos simulados também foram avaliados. Pode-se observar que, quanto maior o *shear factor* e maior número de pontos de integração, maior o tempo de processamento, como pode ser observado nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Tempo de processamento com variação do shear factor

Casos	Shear factor	Pontos de integração	Tempo do <i>solver</i> (Turion 1.8 - Mem 1Gb)
Caso 1	0,5	3	16 min
Caso 2	0,866	3	20 min
Caso 3	1	3	25 min

O *shear factor* não teve influência nas deformações (Tabela 10). Já pelo tempo de processamento (Tabela 11) é possível notar que, com *shear factor* de 0,5, tem-se uma resolução mais rápida do problema por MEF.

Com relação ao número de pontos de integração, observa-se que, com um ponto de integração apenas (Tabela 10), as deformações não ficaram próximas do esperado (valores do ensaio de Nakazima de Chemin, 2004). Nos casos com 2, 3, 4 e 5 pontos de integração, os resultados ficaram bem próximos das deformações de Nakazima. Porém, quanto mais pontos de integração, maior o tempo de processamento (Tabela 12). Com 8 pontos de integração já foi observada uma diferença maior.

Tabela 12 - Tempo de processamento com variação do número de pontos de integração

Shear factor	Pontos de integração	Tempo do <i>solver</i> (Turion 1.8 - Mem 1Gb)
0,866	1	2 min
0,866	2	16 min
0,866	3	20 min
0,866	4	25 min
0,866	5	37 min
0,866	8	56 min

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho alcançou os objetivos previstos inicialmente, dentro das circunstâncias especificadas. Foram efetuados os cálculos dos diagramas de limite de conformação, com adaptações, pelo teste de Marciniak e a implementação por elementos finitos no software ANSYS / LSDYNA utilizando diferentes modelos de material, *shear factor* e pontos de integração.

Quando avaliados os ensaios de Marciniak, verificou-se uma inviabilidade de se trabalhar com *dummy blank* de pequenas espessuras no caso, 0,5 mm, pois esses romperam-se durante o ensaio. O caso que mais se aproximou ao ensaio de Nakazima foi quando se utilizou o *dummy blank* com espessura de 2 mm e furo de Ø 50 mm. Observou-se que, entre *dummy blanks* com furo de diâmetro de 50 mm e de 68 mm houve pouca variação nos resultados.

A metodologia de avaliação do teste de Marciniak apresentada torna-se útil para aplicações industriais em estampagem, pois apresenta diretrizes para caracterização de chapas. Assim, pode-se minimizar o tempo gasto no desenvolvimento do ferramental e podem-se minimizar também os custos relacionados aos testes industriais, contribuindo para um número menor de reformas no ferramental, até a liberação final do estampo.

Pelos valores de deformações obtidos através das simulações, pode-se dizer que o modelo que melhor se aproximou dos resultados experimentais foi o “*Transverse Anisotropic*”. Os resultados gerados pelos outros modelos, porém, não podem ser considerados ruins, uma vez que os valores experimentais foram obtidos por meio de ensaios executados até o ponto de fratura do material, assim, podendo ter variações nos resultados.

As deformações não sofreram alterações significativas com a variação do *shear factor*. Por outro lado, os números de pontos de integração tiveram influência direta nas deformações. Porém, quanto maior o número de pontos de integração, maior é o tempo de processamento, o que pode tornar o processo de simulação inviável. No que se refere às deformações, os casos com *shear factor* igual a 0,866 e 1 com 3 pontos de integração foram os que apresentaram os resultados mais próximos aos experimentais.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Poderá ser implementado o ensaio de Marciniak, para diferentes espessuras do *dummy blank*, através de elementos finitos.

Empregando a mesma idéia de simulação dessa dissertação, utilizar outros modelos de material, estudando suas influências na conformação.

Avaliar a influência de diâmetros menores que 50 mm nos *dummy blanks* no ensaio de Marciniak.

Posteriormente, pode-se testar um punção com diâmetro em rebaixo, ao invés da utilização de *dummy blank*, no centro do punção; ele teria uma parte oca, eliminando o atrito na face do punção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABRANTES, J. P., BATALHA, G. F. **O Uso de Elementos Finitos e da Pressão Hidráulica para Conformar Chapas.** Revista Máquinas e Metais. p.158 -173. 2004.
- ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H. L. **Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações.** Publicação EESC-USP, São Carlos, 1999.
- AZEVEDO, R. L., AWRUCH, A. M. **Geometric nonlinear dynamic analysis of plates and shells using eight-node hexahedral finite elements with reduced integration.** J. Braz. Soc. Mech. Sci., V. 5, pp 51-66, 1989.
- BARLAT, F., LIAN, J. **Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals. Part 1: a yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions.** International Journal of Plasticity, 1989.
- BRESCIANI FO., E., BUTTON, S.T., GOMES, E., NERY, F.A.C. & ZAVAGLIA, C.A.C. **Conformação Plástica dos Metais.** 5ª ed., Ed. da UNICAMP, Campinas, 1997.
- BATHE, K. J. **Finite Elements Procedure in Engineering Analysis.** Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.
- BORSOI, C. A., HENNIG, R., SCHAEFFER, L. **Novo Teste Tecnológico no LdTM para a Melhor Determinação da Conformabilidade de Chapas Metálicas: III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento / Porto Alegre, pp. 50-59, 2000.**
- CHEMIN FILHO, R. A. **Avaliação das Deformações de Chapas Finas e Curvas CLC para Diferentes Geometrias de Punções.** Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba, 2004.
- COOK, R. D., MALKUS, D. S., PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis.** 3ª Edição, John Willey & Sons, 1989.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 2ª Edição, Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 1981.

- EVANGELISTA, S. H. **Diagramas de Limite de Conformação Aplicados à Análise por Elementos Finitos de um Processo de Estampagem em Chapas Metálicas.** Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2000.
- FLC CLUB. **Determination of Forming Limit Curves.** Proposal document of FLC Club to International Standardization Organization (ISO), 2004.
- GOODWIN, G. M. **Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop.** Society of Automotive Engineers, technical paper n°. 680093, 1968.
- HALLQUIST, J. O. **Is-Dyna 3D Theoretical Manual.** Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- HECKER, S. S., **A simple limit curve technique and results on aluminium alloys.** 7th Biennial IDDRG Congress, Amsterdam, Holanda, 1972.
- HOSFORD, W. F., CADDELL, R. M. **Metal Forming - Mechanics and Metallurgy.** 2nd. Ed. N. J., Prentice Hall, 1993.
- HUEBNER, K.H.; THORNTON, E.A. **The Finite Element Method for Engineers.** 2. Ed. John Wiley & Sons, 1982.
- KEELER, S. P. AND BACKOFEN, W.A. **Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches.** ASM, V. 56, pp. 25-48, 1963.
- KEELER, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability:** Part 5 – Die Design and Lubrication, New York, 1968.
- KEELER, S. P. **The Auto/Steel Partnership Enhanced Forming Limit Diagram Project Team.** Southfield, 2003.
- KIKUMA, K., NAKAJIMA, K. **Effect of Deformation and Mechanical Properties on Stretch Forming Limits of Steel Sheets.** ICSTIS, Sec. 5, pp. 827-831, 1968.
- KOBAYASHI, S.; OH, S.I.; ALTAN, T. **Metal Forming and the Finite - Element Method.** Oxford University Press, 1989.
- KUZMAN, K. **Environmental Friendly Lubricants in Deep Drawing of Steel Sheet Metal.** Enform Project. Slovenia, TECOS Celje, 2000.
- LANGE, K., **Modern metal forming technology for industrial production,** Journal of Materials Processing Technology. V. 71, pp.2-13, 1997.
- LANGE, K. **Forming Handbook:** Ed. McGraw Hill and SME, New York, 1993.

- LEE, T. C.; WANG, L. **The effect of yield criteria on the forming limit curve prediction and the deep drawing process simulation.** Department of Industrial and Systems Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, 2005.
- LORENTZ, R., GILAPA, G. M. **Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano.** I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, pp. 141-150, 1998.
- MAKINOUCHE A. **Sheet metal forming simulation in industry.** Source: Journal of Materials Processing Technology, V. 60, N. 1, pp. 19-26, Elsevier Science, 1996.
- MANALIS, A. G., MANOLAKOS, D. E., BALDOUKA, A. K. **Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics part 2.** Deep-drawing of square cups. Journal of Material Processing Technology. V. 72, pp. 110-116, 1997.
- MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L. **The Mechanics of Sheet Metal Forming.** Ed. Arnold, 1992.
- MARCINIAK, Z. AND KUCZYNSKI, K. **Limits Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal.** Int. J. Mech. Science, vol. 9, pp. 609-620, 1967.
- MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. **Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial nas deformações limites em chapas.** VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, pp. 39-49, 2003.
- MOSHFEGH, R., LI, X., NILSON, L. **Adaptive finite element simulation of sheet metal forming process using gradient based indicators.** International LS-DYNA users conference simulation, Dearborn, Michigan, 2000.
- NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. **Study on Formability of Steel Sheets.** Yawata Tech. Rep., pp141, 1968.
- RICHTER, A. **Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação,** VI Conferência Nacional de deformação de chapas, Ed Lúcio Schaeffer, Porto Alegre, pp. 24-29, 2003.
- ROWE, G. W., STRUGESS, C. E. N., HARTLEY, P., PILLINGER, I. **Finite Element Plasticity and Metal Forming Analysis.** Cambridge University Press, 1ª Edição, 1991.

- SAMPAIO, A. P., MARTINS, C. A., SOUZA, P. C. **Caracterização da Conformabilidade de Aço Livre de Intersticiais.** III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento / Brasil, Porto Alegre, 2003.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Porto Alegre: Editora da UFRS, 1999.
- SILVA, H. C. **Análise da simulação numérica do ensaio nakazima via método de elementos finitos.** Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, UFPR, Curitiba, 2005.
- SILVA, H. C., MARCONDES, P. V. P. **MEF pode ser aplicado à análise de punções e matrizes.** Revista Corte e Conformação, Aranda Editora, São Paulo, 2005.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** Edgard Blucher, 1974.
- SROUR, E. H. **Determinação do Grau de Conformabilidade de Chapa de Aço para Suporte de Coluna de Direção e Identificação de Similar Nacional.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- TAYLOR, B. **Formability testing of sheet metals.** In: American Society For Metals. Metals Handbook Forming and Forging. Ed. Metals Park, v.14, pp. 877-899, Ohio, 1988..
- TIGRINHO, L. M. V. **Influência da Lubrificação na Estampagem via Análise das Deformações Obtidas em uma Chapa de Aço de Alta Estampabilidade.** Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- TRISTANO, J. R., CHEN Z., HANCQ, A., KWOK, W. **Fully automatic adaptive mesh refinement integrated into the solution process.** International Meshing Roundtable, 12.th. . Proceedings, Sandia National Laboratories, pp.307-314, 2003.
- USIMINAS. **Conformação na prensa.** Usiminas, n. 6, 1999.
- VEERMAN, C.C. **The Determination and Application of the FLC - Onset of Localized Necking.** 7th Biennal IDDRG Congress, Amsterdam, Holanda, 1972.
- WAN, JIE, KOCAK, S., SHEPHARD, M. S. **Automated adaptive forming simulations Proceedings.** International Meshing Roundtable, 12.th. Proceedings, p.323-334, 2003.
- WU, P. D., GEERS, M. G. **Effect of EDT on Formability of Aluminum Automotive Sheet.** Novelis Global Technology Centre (NGTC), Canadá, 2006.